

# Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica



Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Técnica Industrial Electrónica Industrial

***“Sistema experimental para la  
caracterización de componentes electrónicos  
pasivos a temperaturas criogénicas”***

Autor: José Antonio Cervantes Montoro

Tutor: Ignacio Valiente Blanco

Director: José Luis Pérez Díaz

Leganés, 3 de Abril de 2013

## **INDICE**

AGRADECIMIENTOS.....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT .....	9
1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	10
2. INTRODUCCIÓN.....	11
2.1 RESISTENCIA.....	11
2.2 CONDENSADORES.....	14
2.3 DIODOS .....	18
2.4 DIODOS ZENER .....	20
2.5 SONDAS DE TEMPERATURA PT-100.....	21
2.6 INTRODUCCIÓN A LA CRIOGENIA.....	25
2.8 ESTADO DEL ARTE.....	28
3. ESTUDIO EXPERIMENTAL .....	33
3.1 SET UP DEL EXPERIMENTO .....	34
3.2 EQUIPOS Y COMPONENTES .....	37
3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	43
3.3.1 Procedimientos de ensayo .....	43
3.3.2 Calibración de los sensores .....	44
3.4 PERFIL DE TEMPERATURAS .....	50
3.4.1 POSICIÓN Z VS. TEMPERATURA .....	50
3.4.2 POSICIÓN Y VS. TEMPERATURA.....	53
3.4.3 TIEMPO VS. TEMPERATURA .....	55
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	58
3.5.1 TEMPERATURA VS. RESISTENCIA.....	58
3.5.2 TEMPERATURA VS. CONDENSADORES .....	69
3.5.3 TEMPERATURA VS. DIODOS .....	79
4. PRESUPUESTO.....	90
5. CONCLUSIONES.....	96

6. REFERENCIAS .....	98
7. ANEXOS .....	100
ANEXO I. MANUAL DE SEGURIDAD .....	100
ANEXO II. Características de los sensores PT 100 utilizados en el proyecto .....	108

## **INDICE DE FIGURAS**

Fig. 1 Resistencia de hilo bobinado	11
Fig. 2 Resistencias de película de carbón	12
Fig. 3 Resistencia cerámica	13
Fig. 4 Condensador de papel	14
Fig. 5 Condensador electrolítico	15
Fig. 6 Condensador de Poliéster	16
Fig. 7 Condensador de Tantalio o Tántalo	17
Fig. 8 Explicación de las zonas de la curva de los diodos	18
Fig. 9 Curva diodos Zener	20
Fig. 10 a y b termorresistencia tipo bobinado y laminado	23
Fig. 11 Montaje a 4 hilos	24
Fig. 12 Conductividad térmica de algunos materiales en función de la temperatura	26
Fig. 13 Resistencia mecánica de algunos materiales	26
Fig. 14 Expansión térmica de algunos materiales en función de la temperatura	27
Fig. 15 Resistividad eléctrica en función de la temperatura	27
Fig. 16 Voltaje directo vs. Temperatura	30
Fig. 17 Resistencia normalizada (p.u.) vs. Temperatura	30
Fig. 18 a) Variación de resistencia vs. Temperatura. b) Variación capacidad vs. Temperatura	31
Fig. 19 Porcentaje de cambio de Capacidad en función de la temperatura	32
Fig. 20 Esquema del set up del experimento. 1) Vaso dewar; 2) Mecanismos de posicionamiento XZ; 3) Sistema de referencia XZ; 4) Acople de madera 5) placa de circuito impreso con componentes electrónicos pasivos	34
Fig. 21 Cadena de medida	36
Fig. 22 Representación CAD de la mesa 3D.	37
Fig. 23 Vistas de la mesa 3D.	38
Fig. 24 Vaso Dewar del experimento	38
Fig. 25 Diferentes sondas de temperatura Pt100	39
Fig. 26 Multímetro digital empleado en los ensayos.	40
Fig. 27 Acople de madera y pieza para la colocación de componentes y Pt 100.	41
Fig. 28 Vista de las primeras pruebas y Montaje final	41
Fig. 29 Tarjeta de adquisición de datos NI-6008.	42
Fig. 30 Vista del conexionado de los soportes añadidos al acople	45
Fig. 31 Interpolación cúbica para valores DIN de transducción R-T	45
Fig. 32 Desviación relativa a tabla DIN según la función de interpolación.	46
Fig. 33 Calibración a tres puntos y sus errores para sensores PT 100	47
Fig. 34 Posición Z vs Temperatura para PT1.	51
Fig. 35 Posición Z vs Temperatura para PT5.	51
Fig. 36 Posición Z vs. Temperatura de todas las PT100.	52
Fig. 37 primer ensayo de posición lateral vs. Temperatura	54

<i>Fig. 38 Posición Y vs. Temperatura para Pt 100 de menor precisión.</i>	54
<i>Fig. 39 Posición Y vs. Temperatura para Pt 100 de mayor precisión.</i>	55
<i>Fig. 40 Tiempo vs. Temperatura primer ensayo.</i>	56
<i>Fig. 41 Tiempo vs. Temperatura segundo ensayo.</i>	57
<i>Fig. 42 Temperatura vs. Resistencia película de carbón 2.1.</i>	59
<i>Fig. 43 Temperatura vs. Resistencia película de carbón 2.6.</i>	59
<i>Fig. 44 Temperatura vs. Resistencia película Cu-cobre 2.2.</i>	60
<i>Fig. 45 Temperatura vs. Resistencia de Composición Cerámica 2.3.</i>	61
<i>Fig. 46 Temperatura vs. Resistencia de Metal Vidriado 2.4.</i>	62
<i>Fig. 47 Temperatura vs. Resistencia de Metal Vidriado 2.5.</i>	63
<i>Fig. 48 Temperatura vs. Resistencia de Hilo Bobinado 2.7.</i>	64
<i>Fig. 49 Temperatura vs. Resistencia de Hilo Bobinado 2.11</i>	64
<i>Fig. 50 Temperatura vs. Resistencia de Película Metálica 2.8.</i>	65
<i>Fig. 51 Temperatura vs. Resistencia de Película Metálica 2.12.</i>	66
<i>Fig. 52 Temperatura vs. Variación de resistencia de las resistencias ensayadas.</i>	67
<i>Fig. 53 Temperatura vs. Resistencia Normalizada</i>	68
<i>Fig. 54 Variación de las resistencias después de un ciclo térmico</i>	69
<i>Fig. 55 Temperatura vs. Capacidad condensador de papel 1.1.</i>	70
<i>Fig. 56 Temperatura vs. Capacidad condensador electrolítico 1.2.</i>	71
<i>Fig. 57 Temperatura vs. Capacidad condensador cerámico monocapa 1.3.</i>	73
<i>Fig. 58 Temperatura vs. Capacidad condensador película de plástico 1.4.</i>	74
<i>Fig. 59 Temperatura vs. Capacidad condensador solido de Tántalo 1.5.</i>	75
<i>Fig. 60 Temperatura vs. Capacidad condensador de mica 1.6.</i>	76
<i>Fig. 61 Temperatura vs. Variación de capacidad</i>	78
<i>Fig. 62 Variación de los condensadores después de un ciclo térmico</i>	79
<i>Fig. 63 Variación de los condensadores sin el condensador electrolítico</i>	80
<i>Fig. 64 Temperatura vs. Tensión umbral diodo fabricante NPX 3.1.1.</i>	82
<i>Fig. 65 Temperatura vs. Tensión umbral diodo fabricante Vishay 3.1.2.</i>	82
<i>Fig. 66 Temperatura vs. Tensión umbral diodo fabricante DiodesZetex 3.1.3.</i>	83
<i>Fig. 67 Temperatura vs. Voltaje de todos los diodos</i>	84
<i>Fig. 68 Temperatura vs. Tensión umbral diodo zener 3.2.1.</i>	85
<i>Fig. 69 Temperatura vs. Tensión umbral diodo zener 3.2.2.</i>	86
<i>Fig. 70 Temperatura vs. Tensión umbral diodo zener 3.2.3.</i>	86
<i>Fig. 71 Temperatura vs. Voltaje de todos los diodos zener</i>	88
<i>Fig. 72 Temperatura vs. Variación de voltaje en diodos de conmutación y zener</i>	89
<i>Fig. 73 Guantes aislantes.</i>	102
<i>Fig. 74 Gafas de protección.</i>	103
<i>Fig. 75 Pinzas de plástico.</i>	104
<i>Fig. 76 Depósito principal de nitrógeno líquido de la Universidad Carlos III de Madrid.</i>	104
<i>Fig. 77 Sensores PT 100 Thin film (lámina metálica).</i>	108
<i>Fig. 78 Sensores PT100 Wire wound (hilo enrollado)</i>	109

## **INDICE DE TABLAS**

<i>Tabla 1. Coeficientes para resistencias de diferentes materiales</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2. Rangos de temperatura para termorresistencias de diferentes materiales</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 3. Desviaciones máximas y tolerancias para Pt 100 según DIN IEC 751</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 4. Constantes específicas de algunos fluidos</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 5. Tolerancias máximas para las clases de Pt 100</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 6. Valores promedio medidos de resistencia en tres sensores</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 7. Valores de temperatura equivalentes a la tabla 7.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 8. Error estimado respecto temperatura real.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 9. Nombre y tipo de sensor Pt100 utilizados en los ensayos</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 10. Características más importantes de las resistencias del ensayo.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 11. Características más importantes de los condensadores del ensayo.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 12. Características más importantes de los diodos del ensayo.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 13. Efectos de la carencia de oxígeno en el ser humano.</i>	<i>101</i>

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera aprovechar esta oportunidad para agradecer, en primer lugar, a mis padres por todo el esfuerzo que han hecho todos estos años, y que se vean recompensados y puedan sentirse orgullosos.

También agradecer a mi tutor, Ignacio Valiente y a José Luis Pérez su confianza en mí, su total disponibilidad para trabajar conmigo y la facilidad para poder quedar en los horarios que a mi mejor me venían, su paciencia para explicarme la cosas y repetírmelas las veces que hiciera falta y sus sabios consejos.

Además quiero agradecer a Cristian su tiempo y atención para que yo pudiera seguir trabajando en los meses que Ignacio no estaba y a todos los compañeros de Ignacio que siempre se preocupaban por cómo iba y me echaban una mano en lo que podían.

Por último agradecer a mis hermanos y amigos por su apoyo incondicional en todo momento y sus ánimos en los momentos más duros de la carrera.

## **RESUMEN**

El presente proyecto fin de carrera versa sobre el estudio experimental del comportamiento de componentes electrónicos pasivos en temperaturas criogénicas. Se ha propuesto un método económico y eficiente para caracterizar estos componentes a bajas temperatura utilizando nitrógeno líquido  $\text{LN}_2$  a presión atmosférica ( $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Se han investigado diferentes componentes electrónicos que incluyen resistencias, condensadores y diodos de diversos tipos, comparándose las prestaciones entre ellos. Algunos de los componentes estudiados han demostrado unas excelentes propiedades a temperaturas criogénicas, mientras que otros no tanto. Este trabajo puede resultar útil para investigadores que necesiten construir circuitos electrónicos en ambientes criogénicos.



## **ABSTRACT**

This final project deals with the experimental study of passive electronic components in cryogenic temperatures. It has proposed an economical and efficient method to characterize these components at low temperature using liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) at atmospheric pressure (-195.8 ° C).

Have been investigated various electronic components including resistors, capacitors and diodes of various types, comparing the performance between them. Some of the compounds studied have shown excellent properties at cryogenic temperatures, while others not so much. This work can be useful to researchers who need to build electronic circuits in cryogenic environments.

## **1. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El principal objetivo de este proyecto es el diseño e implementación de un sistema experimental para la caracterización de componentes electrónicos pasivos desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido a presión ambiente (- 195,8°C).

Utilizando dicho sistema experimental, se pretende la caracterización de componentes pasivos como resistencias, condensadores, diodos, diodos zener y sondas de temperatura Pt-100 a temperaturas criogénicas.

Por último, se redacta este proyecto para la obtención del título de Ingeniería Técnica Industrial especialidad en Electrónica Industrial.

## 2. INTRODUCCIÓN

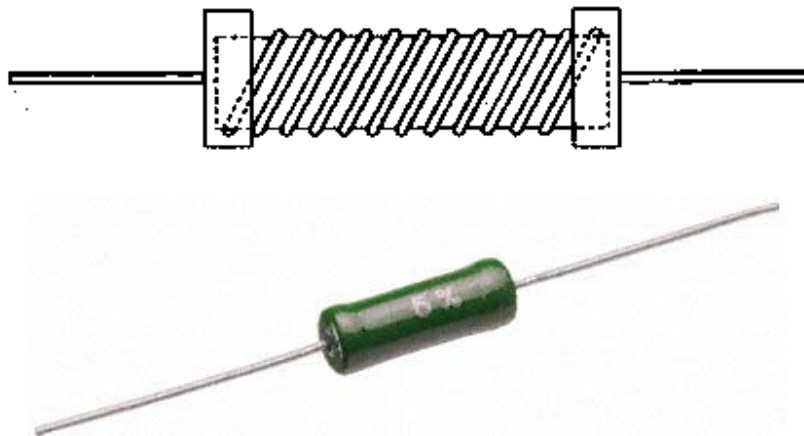
### 2.1 RESISTENCIA

Se denomina resistor al componente electrónico diseñado para introducir una resistencia eléctrica determinada entre dos puntos de un circuito. En el propio argot eléctrico y electrónico, son conocidos simplemente como resistencias.

Es un material formado por carbón y otros elementos resistivos para disminuir la corriente que pasa. Se opone al paso de la corriente. La corriente máxima en un resistor viene condicionada por la máxima potencia que pueda disipar su cuerpo. Los valores más comunes son 0,25 W, 0,5 W y 1 W.

Por su composición, podemos distinguir varios tipos de resistencias:

**Resistencias de hilo bobinado:** Fueron de los primeros tipos en fabricarse, y aún se utilizan cuando se requieren potencias algo elevadas de disipación. Están constituidas por un hilo conductor bobinado en forma de hélice o espiral (a modo de rosca de tornillo) sobre un sustrato cerámico.



*Fig. 1 Resistencia de hilo bobinado*

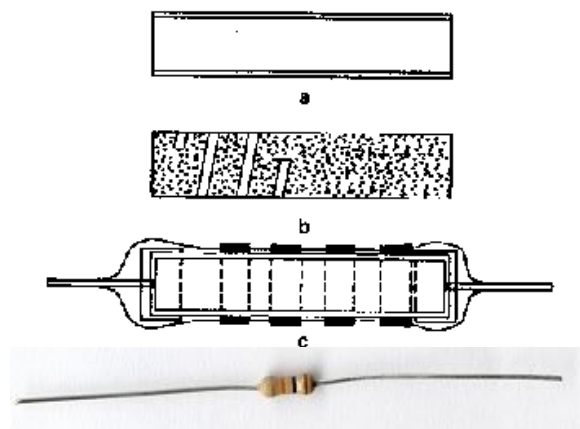
Las aleaciones empleadas son las que se dan en la tabla, y se procura la mayor independencia posible de la temperatura, es decir, que se mantenga el valor en ohmios independientemente de la temperatura.

metal	resistividad relativa (Cu = 1)	Coef. Temperatura a (20° C)
Aluminio	1.63	+ 0.004
Cobre	1.00	+ 0.0039
Constantan	28.45	± 0.0000022
Karma	77.10	± 0.0000002
Manganina	26.20	± 0.0000002
Cromo-Níquel	65.00	± 0.0004
Plata	0.94	+ 0.0038

*Tabla 1. Coeficientes para resistencias de diferentes materiales*

**Resistencias de película de carbón:** Este tipo es muy habitual hoy día, y es utilizado para valores de hasta 2 vatios. Se utiliza un tubo cerámico como sustrato sobre el que se deposita una película de carbón tal como se aprecia en la figura.

Para obtener una resistencia más elevada se practica una hendidura hasta el sustrato en forma de espiral, tal como muestra (b) con lo que se logra aumentar la longitud del camino eléctrico, lo que equivale a aumentar la longitud del elemento resistivo.



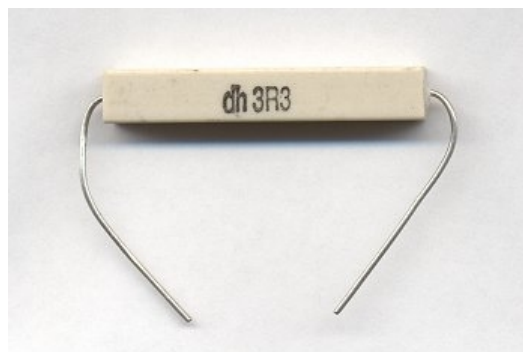
*Fig. 2 Resistencias de película de carbón*

Las conexiones externas se hacen mediante crimpado de cazoletas metálicas a las que se une hilos de cobre bañados en estaño para facilitar la soldadura. Al conjunto completo se le baña de laca ignífuga y aislante o incluso vitrificada para mejorar el aislamiento eléctrico. Se consiguen así resistencias con una tolerancia del 5% o mejores.

**Resistencias de película metálica:** Este tipo de resistencia es el que mayoritariamente se fabrica hoy día, con unas características de ruido y estabilidad mejoradas con respecto a todas las anteriores. Tienen un coeficiente de temperatura muy pequeño, del orden de 50 ppm/°C (partes por millón y grado Centígrado). También soportan mejor el paso del tiempo, permaneciendo su valor en ohmios durante un mayor período de tiempo. Se fabrican este tipo de resistencias de hasta 2 vatios de potencia, y con tolerancias del 1% como tipo estándar.

**Resistencias de metal vidriado:** Son similares a las de película metálica, pero sustituyendo la película metálica por otra compuesta por vidrio con polvo metálico. Como principal característica cabe destacar su mejor comportamiento ante sobrecargas de corriente, que puede soportar mejor por su inercia térmica que le confiere el vidrio que contiene su composición. Como contrapartida, tiene un coeficiente térmico peor, del orden de 150 a 250 ppm/°C. Se fabrican de potencias de hasta 3 vatios. Se dispone de estas resistencias encapsuladas en chips tipo DIL (dual in line) o SIL (single in line).

**Resistencias cerámicas:** Los metales aumentan un poco su resistencia al aumentar el calor, pero este tipo de cerámicas no tienen una respuesta resistiva lineal al calor. Cuando esta resistencia pasa su umbral de temperatura pierde conductividad. Como resultado, son resistencias y a la vez termostatos, ya que permiten pasar corriente cuándo están fríos pero dejan de conducir corriente al calentarse. Estas resistencias están hechas de titanato de bario o titanato de plomo (BaTiO<sub>3</sub> o PbTiO<sub>3</sub>).



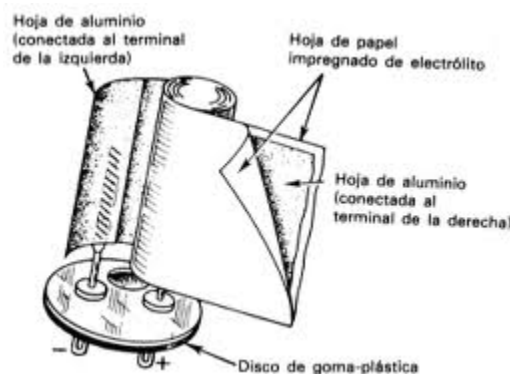
**Fig. 3 Resistencia cerámica**

## 2.2 CONDENSADORES

Un condensador (en inglés, capacitor, nombre por el cual se le conoce frecuentemente en el ámbito de la electrónica y otras ramas de la física aplicada), es un dispositivo pasivo, utilizado en electricidad y electrónica, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Está formado por un par de superficies conductoras, generalmente en forma de láminas o placas, en situación de influencia total (esto es, que todas las líneas de campo eléctrico que parten de una van a parar a la otra) separadas por un material dieléctrico o por el vacío. Las placas, sometidas a una diferencia de potencial, adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de ellas y negativa en la otra, siendo nula la variación de carga total.

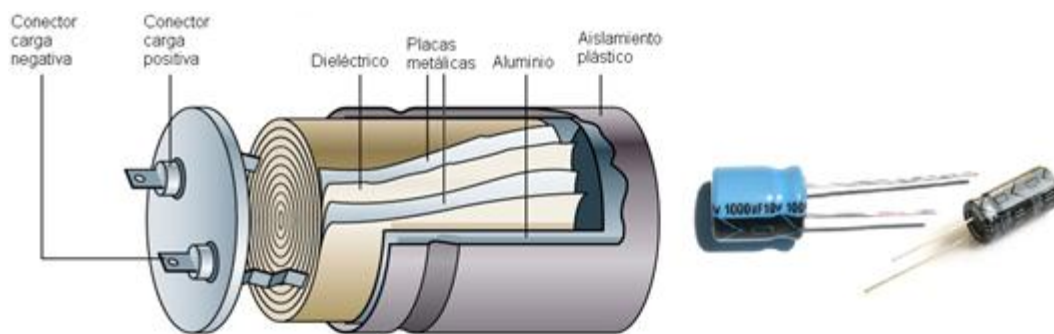
A continuación se especifican los tipos de condensadores según su dieléctrico que se han utilizado:

**Condensadores de papel:** El dieléctrico es papel parafinado, bakelizado o sometido a algún otro tratamiento que reduce su higroscopia y aumenta el aislamiento. Se apilan dos cintas de papel, una de aluminio, otras dos de papel y otra de aluminio y se enrollan en espiral. Las cintas de aluminio constituyen las dos armaduras, que se conectan a sendos terminales. Se utilizan dos cintas de papel para evitar los poros que pueden presentar. Destaca su reducido volumen y gran estabilidad frente a cambios de temperatura. Se fabrican en capacidades comprendidas entre 1uF y 480uF con tensiones entre 450v y 2,8Kv.



*Fig. 4 Condensador de papel*

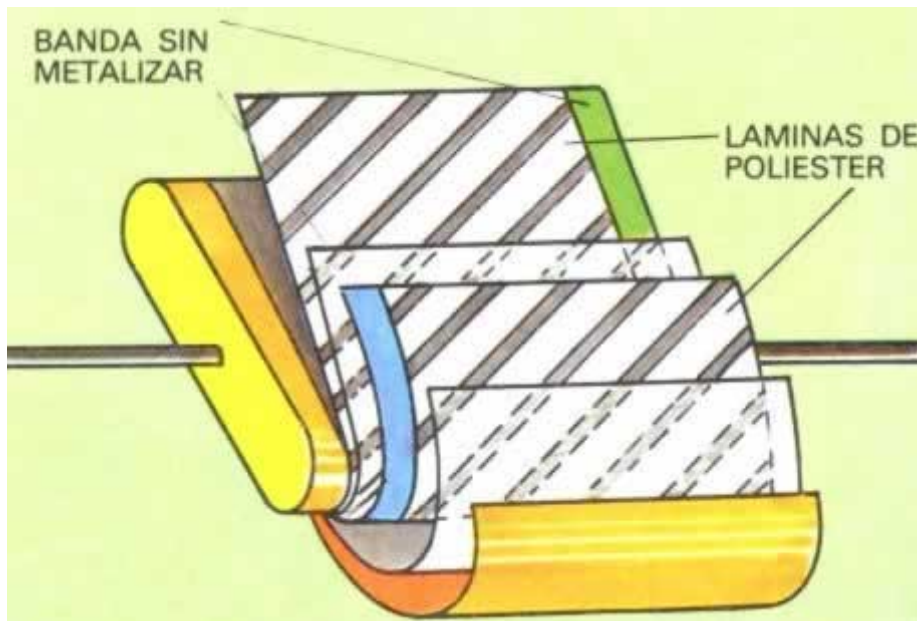
**Condensadores electrolíticos:** Es un tipo de condensador que utiliza un electrolito, como su primera armadura, la cual actúa como cátodo. Con la tensión adecuada, el electrolito deposita una capa aislante (la cual es en general una capa muy fina de óxido de aluminio) sobre la segunda armadura o cuba (ánodo), consiguiendo así capacidades muy elevadas. Son inadecuados para funcionar con corriente alterna. Existen varios tipos, según su segunda armadura y electrolito empleados, que en nuestro caso son: *Condensadores de aluminio:* Es el tipo normal. La cuba es de aluminio y el electrolito una disolución de ácido bórico.



*Fig. 5 Condensador electrolítico*

**Condensadores cerámicos:** Existen diferentes tipos formados por una sola lámina de dieléctrico, pero también los hay formados por láminas apiladas. Dependiendo del tipo, funcionan a distintas frecuencias, llegando hasta las microondas. El proceso de fabricación consiste básicamente en la metalización de las dos caras del material cerámico. Se fabrican de 1pF a 1nF (grupo I) y de 1pF a 470nF (grupo II) con tensiones comprendidas entre 3 y 10000v. Se utilizan en circuitos que necesitan alta estabilidad y bajas pérdidas en altas frecuencias.

**Condensadores de película de plástico:** Está formado por láminas delgadas de poliéster sobre las que se deposita aluminio, que forma las armaduras. Se apilan estas láminas y se conectan por los extremos. Del mismo modo, también se encuentran condensadores de policarbonato y polipropileno. Se fabrican en forma de bobinas o multicapas y de 1nF a 100mF y tensiones de 25-63-160-220-630v, 0.25-4Kv.

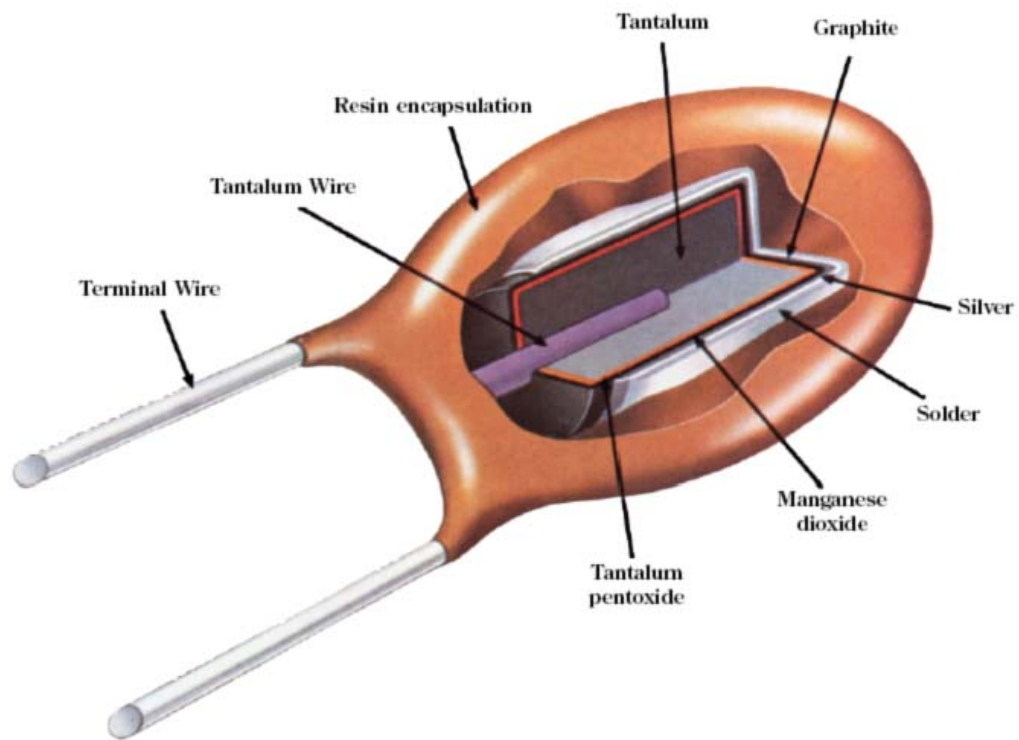


*Fig. 6 Condensador de Poliéster*

**Condensadores de mica:** Sobre una cara de la lámina de mica se deposita aluminio, que forma una armadura. Se apilan varias de estas láminas, soldando los extremos alternativamente a cada uno de los terminales. Estos condensadores funcionan bien en altas frecuencias y soportan tensiones elevadas, pero son caros y se ven gradualmente sustituidos por otros tipos. Se utilizan en gamas de capacidades comprendidas entre 5pf y 100000pF. La gama de tensiones para las que se fabrican suelen ser altas (hasta 7500v).

**Condensadores de tantalio (tántalos):** Con el tantalio se consiguen más microfaradios por voltio por unidad de volumen que con el aluminio ya que se consiguen láminas de tantalio de un espesor de 0,03 mm en comparación con el espesor de las láminas de aluminio que son de 0,05 a 0,3 mm. Los valores que se pueden producir van desde 0,002  $\mu\text{F}$  hasta 1000  $\mu\text{F}$  para tensiones de 3 a 600 V. Generalmente, las mayores capacidades se disponen para bajas tensiones.



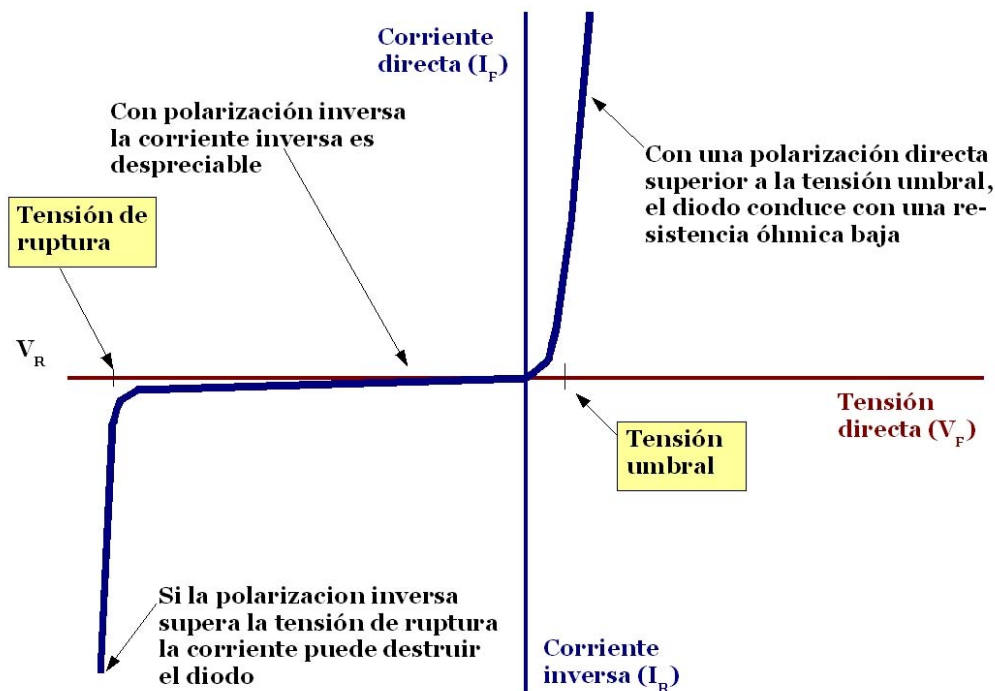


*Fig. 7 Condensador de Tantalio o Tántalo*

## 2.3 DIODOS

Un diodo es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido. Este término generalmente se usa para referirse al diodo semiconductor; consta de una pieza de cristal semiconductor conectada a dos terminales eléctricos.

De forma simplificada, la curva característica de un diodo (I-V) consta de dos regiones: por debajo de cierta diferencia de potencial, se comporta como un circuito abierto (no conduce), y por encima de ella como un circuito cerrado con una resistencia eléctrica muy pequeña. Debido a este comportamiento, se les suele denominar rectificadores, ya que son dispositivos capaces de suprimir la parte negativa de cualquier señal.



**Fig. 8** Explicación de las zonas de la curva de los diodos

Un diodo semiconductor moderno está hecho de cristal semiconductor como el silicio con impurezas en él para crear una región que contiene portadores de carga negativos (electrones), llamado semiconductor de tipo n, y una región en el otro lado que contiene portadores de carga positiva (huecos), llamado semiconductor tipo p. Los

terminales del diodo se unen a cada región. El límite dentro del cristal de estas dos regiones, llamado una unión PN, es donde la importancia del diodo toma su lugar. El cristal conduce una corriente de electrones del lado n (llamado cátodo), pero no en la dirección opuesta; es decir, cuando una corriente convencional fluye del ánodo al cátodo (opuesto al flujo de los electrones).

A medida que progresa el proceso de difusión, la región de agotamiento va incrementando su anchura profundizando en los cristales a ambos lados de la unión. Sin embargo, la acumulación de iones positivos en la zona n y de iones negativos en la zona p, crea un campo eléctrico (E) que actuará sobre los electrones libres de la zona n con una determinada fuerza de desplazamiento, que se opondrá a la corriente de electrones y terminará deteniéndolos.

Este campo eléctrico es equivalente a decir que aparece una diferencia de tensión entre las zonas p y n. Esta diferencia de potencial ( $V_D$ ) es de 0,7 V en el caso del silicio y 0,3 V para los cristales de germanio. Cuando se somete al diodo a una diferencia de tensión externa, se dice que el diodo está polarizado, pudiendo ser la polarización directa o inversa.

## 2.4 DIODOS ZENER

El diodo Zener, es un diodo de silicio que se ha construido para que funcione en las zonas de rupturas. Llamados a veces diodos de avalancha o de ruptura, el diodo zener es la parte esencial de los reguladores de tensión con independencia de que se presenten grandes variaciones de la tensión de red, de la resistencia de carga y temperatura.

Analizando la curva del diodo zener se ve que conforme se va aumentando negativamente el voltaje aplicado al diodo, la corriente que pasa por el aumenta muy poco. Pero una vez que se llega a un determinado voltaje, llamada voltaje o tensión de Zener ( $V_Z$ ), el aumento del voltaje (siempre negativamente) es muy pequeño, pudiendo considerarse constante.

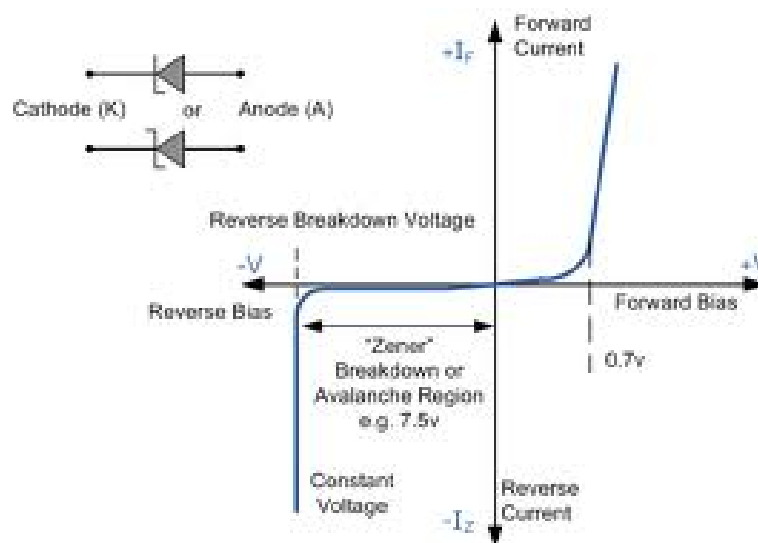


Fig. 9 Curva diodos Zener

Los diodos Zener pueden diferenciarse entre ellos según tres características de construcción del diodo: la tensión de polarización inversa o tensión zener, la potencia máxima de disipación o corriente capaz de soportar y la corriente mínima de funcionamiento. La potencia que disipa un diodo zener es simplemente la multiplicación del voltaje para el que fue fabricado por la corriente que circula por él.

$$P_Z = V_Z \times I_Z$$

## **2.5 SONDAS DE TEMPERATURA PT-100**

La termorresistencia trabaja según el principio de que en la medida que varía la temperatura, su resistencia se modifica, y la magnitud de esta modificación puede relacionarse con la variación de temperatura. Tienen elementos sensitivos basados en conductores metálicos, que cambian su resistencia eléctrica en función de la temperatura. Este cambio en resistencia se puede medir con un circuito eléctrico, que consiste de un elemento sensitivo, una fuente de tensión auxiliar y un instrumento de medida.

Los dispositivos RTD más comunes están contruidos con una resistencia de platino (Pt), llamadas también PRTD, es el material más estable y exacto. La relación resistencia temperatura correspondiente al alambre de platino es tan reproducible que la Termorresistencia de platino se utiliza como estándar internacional de temperatura desde -260°C hasta 630°C. También se utilizan otros materiales fundamentalmente níquel, níquel-hierro, cobre y tungsteno. Típicamente tienen una resistencia entre 20Ω y 20kΩ. La ventaja más importante es que son lineales dentro del rango de temperatura entre -200°C y 850°C.

<b>Material</b>	<b>Rango de temperatura (°C)</b>	<b>Variación coef. (%/°C a 25°C)</b>
Platino	-200 a + 850	0.39
Níquel	-80 a + 320	0.67
Cobre	-200 a + 260	0.38
Níquel-acero	-200 a + 260	0.46

*Tabla 2. Rangos de temperatura para termorresistencias de diferentes materiales*

La termorresistencia Industrial de alambre de platino más ampliamente utilizada se la calibra con una resistencia de 100 Ohms a 0°C.

Para una termorresistencia de platino de 100 Ohms a 0°C, la variación de resistencia promedio para una variación de temperatura de 100°C es de 0,385 Ohms; un circuito de medición con una fuente de corriente de 1 mA registraría 38,5 mV para cada

100°C de variación de temperatura. Este valor de tensión es diez veces mayor que la salida de una termocupla Tipo K, y esto explica por qué los alambres de conexión de termorresistencias resultan menos susceptibles de sufrir interferencias provenientes de la cercanía de equipos eléctricos y líneas de potencia. Sin embargo una buena instalación requiere cables de conexión blindados tanto para termocuplas como para termorresistencias.

Existen dos clases principales para la calibración según DIN EN (IEC) 60 751:

Clase A: máx. desvío  $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$  (0,06 Ohm) a  $0^{\circ}\text{C}$

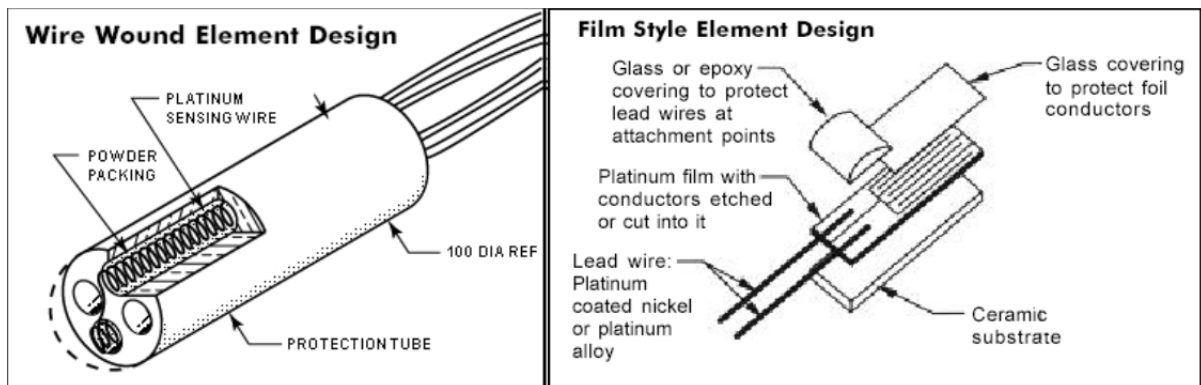
Clase B: máx. desvío  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  (0,12 Ohm) a  $0^{\circ}\text{C}$

Rango	Valores básicos de acuerdo a DIN IEC 751 para resistencias de platino		Tolerancias de acuerdo a DIN IEC 751 para resistencias de platino			
			Clase "A"		Clase "B"	
$^{\circ}\text{C}$	Ohms	Ohms/K	Ohms	$^{\circ}\text{C}$	Ohms	$^{\circ}\text{C}$
-200	18.49	0.44	$\pm 0.24$	$\pm 0.55$	$\pm 0.56$	$\pm 1.3$
-100	60.25	0.41	$\pm 0.14$	$\pm 0.35$	$\pm 0.32$	$\pm 0.8$
0	100.00	0.39	$\pm 0.06$	$\pm 0.15$	$\pm 0.12$	$\pm 0.3$
100	138.50	0.38	$\pm 0.13$	$\pm 0.35$	$\pm 0.30$	$\pm 0.8$
200	175.84	0.37	$\pm 0.20$	$\pm 0.55$	$\pm 0.48$	$\pm 1.3$
300	212.02	0.35	$\pm 0.27$	$\pm 0.75$	$\pm 0.64$	$\pm 1.8$
400	247.04	0.34	$\pm 0.33$	$\pm 0.95$	$\pm 0.79$	$\pm 2.3$
500	280.90	0.33	$\pm 0.38$	$\pm 1.15$	$\pm 0.93$	$\pm 2.8$
600	313.59	0.33	$\pm 0.43$	$\pm 1.35$	$\pm 1.06$	$\pm 3.3$
700	345.13	0.31	-	-	$\pm 1.17$	$\pm 3.8$
800	375.71	0.30	-	-	$\pm 1.28$	$\pm 4.3$
850	390.26	0.29	-	-	$\pm 1.34$	$\pm 4.6$

*Tabla 3. Desviaciones máximas y tolerancias para Pt 100 según DIN IEC 751*

Las termorresistencias de uso más común se fabrican de alambres finos soportados por un material aislante y luego encapsulados. El elemento encapsulado se inserta luego dentro de una vaina o tubo metálico cerrado en un extremo que se llena con un polvo aislante y se sella con cemento para impedir que absorba humedad.

Hay dos tipos según su construcción, bobinado o laminado.



*Fig. 10 a y b termorresistencia tipo bobinado y laminado*

### **RTD de Hilo bobinado o enrollado (wire wound configuration)**

Se construyen básicamente, enrollando un filamento muy fino de platino, hasta que haya suficiente material como para igualar una resistencia de 100 ohms. Esta bobina es luego insertada en los agujeros de un núcleo de óxido de aluminio y luego empaquetada con una fina capa de cerámica para prevenir cortocircuitos en el sensor y darle a este una resistencia a las vibraciones. Este es un método que consume mucho tiempo, ya que todo el trabajo es hecho manualmente bajo el microscopio, pero el resultado es un diseño “strainfree” (libre de tensiones) donde el hilo se puede expandir o contraer libre de influencias de otros materiales en el ensamblaje.

Este diseño nos brinda el coeficiente de temperatura más alto ( $0.003923 \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$ ) disponible para uso industrial. Por otro lado posee la mejor exactitud y estabilidad térmica a largo plazo. Pero como contrapartida, el tiempo de respuesta es más lento que otro tipo de sensores. Otra desventaja de este diseño es el alto costo.

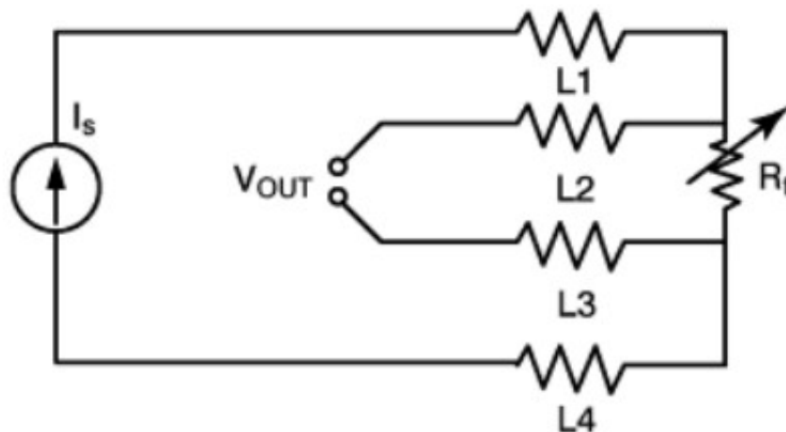
### **RTD de Lámina metálica (thin film configuration)**

Estos elementos se manufacturan, depositando una fina capa de platino en un sustrato de cerámica. El metal es depositado en un patrón específico y ajustado a su

resistencia final. Posteriormente los elementos son recubiertos con una resina de epoxi o vidrio para proteger a la resistencia de la humedad y el polvo. Una ventaja de este tipo de configuración es que una resistencia mucho mayor puede ser ubicada en un área mucho más pequeña. Estos sensores son susceptibles a cierta tensión y tienen un coeficiente de temperatura máximo de  $0.00385 \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$ .

Existen 3 modos de conexión para las Pt100, cada uno de ellos requiere un instrumento lector distinto. El objetivo es determinar exactamente la resistencia eléctrica  $R(t)$  del elemento sensor de platino sin que influya en la lectura la resistencia de los cables  $R_c$ . En nuestro caso el método que vamos a utilizar es el montaje a 4 hilos:

El método de 4 hilos es el más preciso de todos, los 4 cables pueden ser distintos (distinta resistencia) pero el instrumento lector es más costoso.



**Fig. 11 Montaje a 4 hilos**

Por los cables 1 y 4 se hace circular una corriente  $I$  conocida a través de  $R(t)$  provocando una diferencia de potencial  $V$  en los extremos de  $R(t)$ . Los cables 2 y 4 están conectados a la entrada de un voltímetro de alta impedancia luego por estos cables no circula corriente y por lo tanto la caída de potencial en los cables  $R_{c2}$  y  $R_{c3}$  será cero ( $dV=I_c \cdot R_c=0 \cdot R_c=0$ ) y el voltímetro medirá exactamente el voltaje  $V$  en los extremos del elemento  $R(t)$ . Finalmente el instrumento obtiene  $R(t)$  al dividir  $V$  medido entre la corriente  $I$  conocida.



## 2.6 INTRODUCCIÓN A LA CRIOGENIA

La criogenia (del griego κρύος [kryos], frío, y γενεα [geneia], generación) es el conjunto de técnicas utilizadas para enfriar un material a la temperatura de ebullición del nitrógeno o a temperaturas aún más bajas. La temperatura de ebullición del nitrógeno, es decir 77,36 K (o lo que es lo mismo -195,79 °C) se alcanza sumergiendo a una muestra en nitrógeno líquido.

Suelen considerarse como temperaturas criogénicas las que están por debajo de la de la nieve carbónica (punto de sublimación normal  $T = 194 \text{ K} = -79 \text{ °C}$ ), aunque desde ahí hasta la temperatura de ebullición normal del metano ( $112 \text{ K} = -161 \text{ °C}$ ) apenas hay aplicaciones de interés. Posteriormente, el National Institute of Standards and Technology de Colorado (EEUU) definió la frontera entre temperaturas bajas y criogénicas en  $93,15 \text{ K} (-180\text{°C})$  a presión de 1 atm. Dicha frontera, crea una barrera entre la licuefacción de gases como el oxígeno, el helio o el nitrógeno de otros refrigerantes comerciales como el Freón. A pesar de quedar definida la frontera, la definición más generalizada, es admitir como temperaturas criogénicas las que estén por debajo de 120 K, temperatura de licuefacción del Kriptón (Kr) a presión de una atmosfera. En la tabla 4, se recogen datos de interés en el estudio de gases empleados típicamente en estudios criogénicos.

<i>FLUIDOS</i>	<i>Punto de ebullición normal 1 atm</i>	<i>Temperatura crítica °K</i>	<i>Presión crítica atm</i>	<i>Temperatura de inversión máxima °K</i>
<i>Oxígeno</i>	90,2 °K	154,6	49,8	764
<i>Argón</i>	87,3 °K	150,8	48,1	794
<i>Nitrógeno</i>	77,4 °K	128,2	33,5	607
<i>Hidrógeno</i>	20,4 °K	33,2	12,8	195
<i>Helio</i>	4,21 °K	5,19	2,24	23,6
<i>Anhídrido Carbónico</i>	194,6 °K	304,2	7,41	1275
<i>Aire</i>	80*	133	38	603

\* La temperatura del aire es variable

Tabla 4. Constantes específicas de algunos fluidos

## Comportamiento de los materiales a temperaturas bajas

El comportamiento de los materiales y elementos químicos varía en función de la temperatura a la que se encuentran. Así pues, la conductividad térmica de algunos materiales puede ser directa o inversamente proporcional cuando la temperatura disminuye. En la siguiente figura se pueden ver el comportamiento de algunos elementos químicos y materiales.

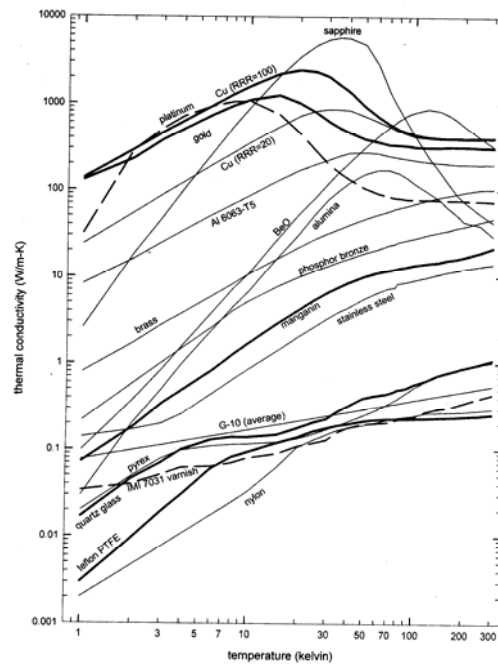


Fig. 12 Conductividad térmica de algunos materiales en función de la temperatura

Igualmente, la resistencia mecánica de algunos materiales también se ve afectada por el valor de la temperatura a la que se encuentran, como poder observarse en la siguiente figura, en la cual se muestra el comportamiento del módulo de Young y del límite elástico.

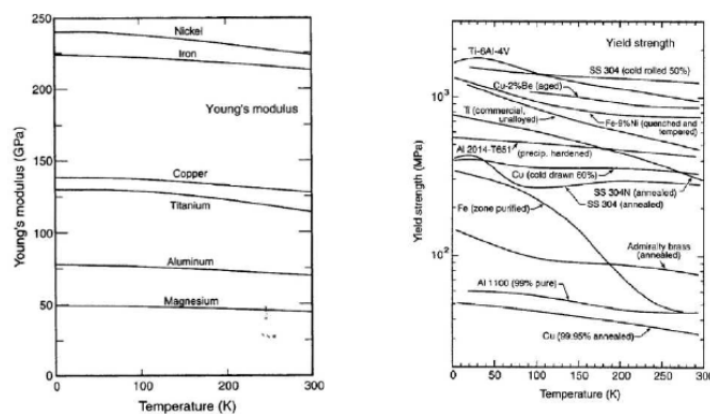
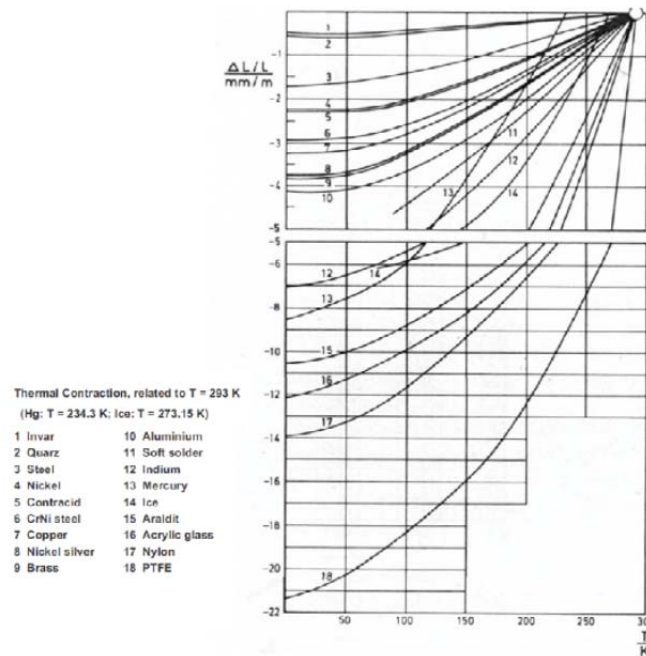


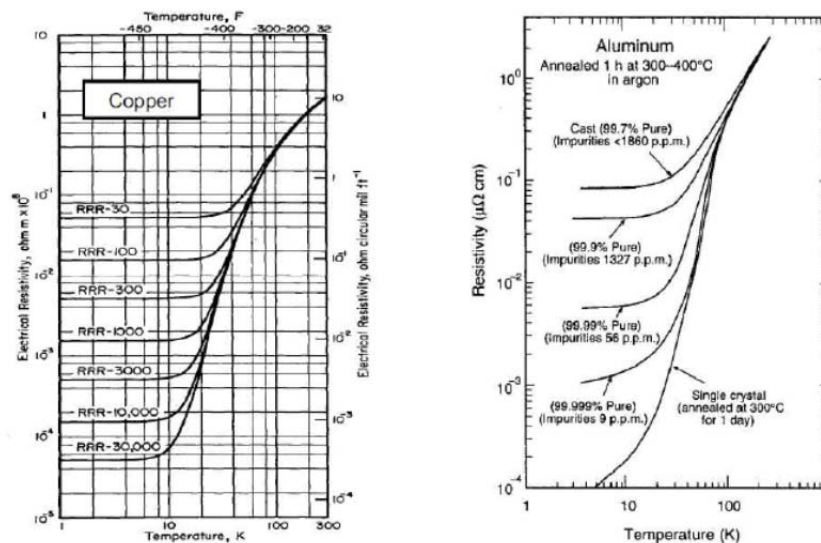
Fig. 13 Resistencia mecánica de algunos materiales

La expansión térmica de algunos materiales no varía de manera lineal en un gran rango de las temperaturas criogénicas como se puede ver en la figura 13. Algo que también se puede observar es que a partir de 200 K, la no linealidad del fenómeno se hace más patente.



*Fig. 14 Expansión térmica de algunos materiales en función de la temperatura*

Otro de los comportamientos que pensamos que hay que tener en cuenta y que tiene repercusión en este proyecto es la resistividad de que pueden tener algunos elementos en función de la temperatura.



*Fig. 15 Resistividad eléctrica en función de la temperatura*

## **2.8 ESTADO DEL ARTE**

Para explicar de forma más detallada de lo que van a constar los estudios y las pruebas realizadas, se hará un breve resumen de algunos estudios ya hechos sobre el comportamiento y funcionamiento de los componentes pasivos a temperaturas criogénicas y sobre la criogenia. También con esto, se pretende dar un paso más a los estudios ya realizados e intentar profundizar más en este campo de conocimiento.

Uno de los motivos por los que se empezó a trabajar en el campo de la criogenia con componentes electrónicos es que se vio que se podrían obtener ventajas si los circuitos funcionaban a estas temperaturas. En la mayoría de los casos mejora el rendimiento existente de los circuitos, evitando el gasto y la demora que supondrían los avances en el diseño y la fabricación que serían necesarios para lograr el mismo rendimiento a temperatura ambiente. En relación con el tema del diseño y la fabricación, viene al caso hablar de la tecnología que en ocasiones es un pequeño obstáculo. Trabajar a temperaturas criogénicas supone, de algún modo, una manera de contrarrestar los efectos perjudiciales de la actual tecnología. Por otro lado, tiene una parte positiva, ya que con ella se ampliaría el campo en el que avanzar y desarrollar para conseguir que sea mucho más fiable, segura y que se pueda utilizar en muchos campos de la electrónica.

Otro de los motivos por los que se empezó a trabajar con componentes electrónicos a bajas temperaturas fue por la necesidad de saber el comportamiento de los mismos en el espacio y en las diferentes misiones espaciales, ya que la temperatura a la que tienen que trabajar los circuitos en el espacio van desde los 175°C a los que se encuentra el planeta Mercurio como a los -222°C que se encuentra Neptuno.

Debido a esto, la NASA se ha puesto manos a la obra y en algunos de sus centros de investigación como el NASA Glenn Research Center (GRC), han lanzado un programa de investigación y desarrollo de componentes electrónicos y sistemas adecuados para aplicaciones en misiones espaciales. Con este programa están intentando conseguir un mayor rendimiento y fiabilidad de los dispositivos y

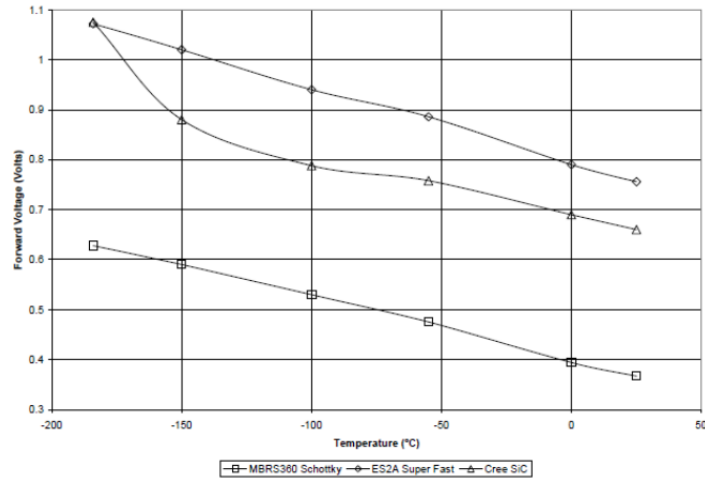
componentes electrónicos. Otro de los objetivos es abaratar el coste de las misiones estudiando una cantidad grande de componentes y dispositivos comerciales de uso común, para averiguar sus comportamientos, posibles materiales a utilizar o posibles tecnologías o topologías a desarrollar para mejorar las existentes.

Para trabajar en las mismas condiciones que se darían en el espacio, el centro de investigación ha diseñado y fabricado unas cámaras en las cuales han conseguido que se trabaje en un rango de temperaturas de 200°C a -196°C en unas condiciones controladas que permiten mantener el tiempo requerido dichas condiciones para realizar el estudio de los componentes.

En un estudio realizado por algunos investigadores americanos llamado *“Development of an extreme environment DC motor drive full bridge power stage using commercial-off-the-shelf components”* realizado sobre transistores en los cuales se han elegido tres tecnologías diferentes, tales como, silicon MOSFET, SOI MOSFET y SiC JFET se han hecho pruebas estudiando el voltaje umbral, la resistencia interna y el voltaje de ruptura con respecto a la temperatura. En lo que a la tensión umbral se refiere, para la tecnología de Silicon MOSFET permanece constante según baja la temperatura, mientras que para SOI MOSFET y SiC JFET aumenta según va descendiendo la temperatura. Para la resistencia interna, en las tecnologías Silicon MOSFET y SOI MOSFET desciende según desciende la temperatura sobre todo en el SOI MOSFET, mientras que para, SiC JFET empieza descendiendo levemente pero al final aumenta bastante su valor. En cuanto al voltaje de ruptura, para las tecnologías de Silicon MOSFET y SOI MOSFET desciende muy levemente con respecto a la temperatura, mientras que para, SiC JFET el descenso es mucho más acusado. Cuando dichos transistores vuelven a la temperatura ambiente no sufren ningún cambio en sus propiedades y no se ven afectados por trabajar a bajas temperaturas. Según este estudio la mejor elección para trabajar a temperaturas criogénicas son los Silicon MOSFET seguidos de los SOI MOSFET, mientras que los SiC JFET no son recomendables para este uso.

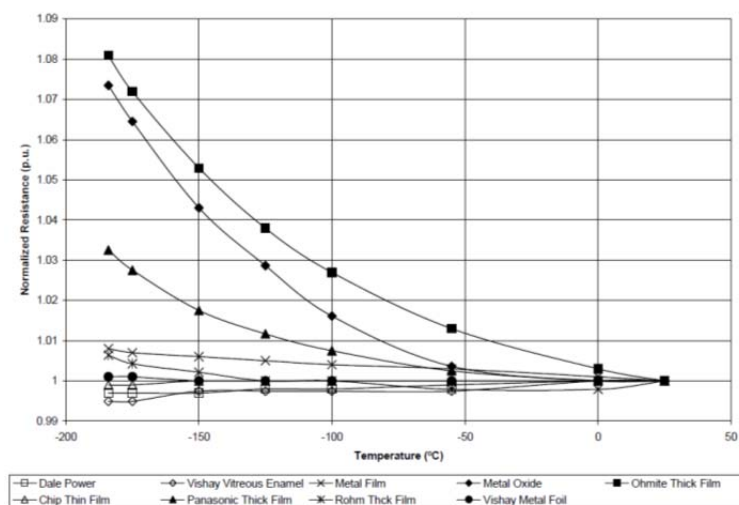
En este mismo estudio también se realizaron pruebas a diodos rectificadores con tres tecnologías diferentes, como son silicon schottky, silicon super-fast, y SiC schottky. Las pruebas que se han realizado son comparar el voltaje directo, la resistencia interna y

el voltaje de ruptura con respecto a la temperatura. En la siguiente figura se puede observar como varia el voltaje directo con respecto a la temperatura.



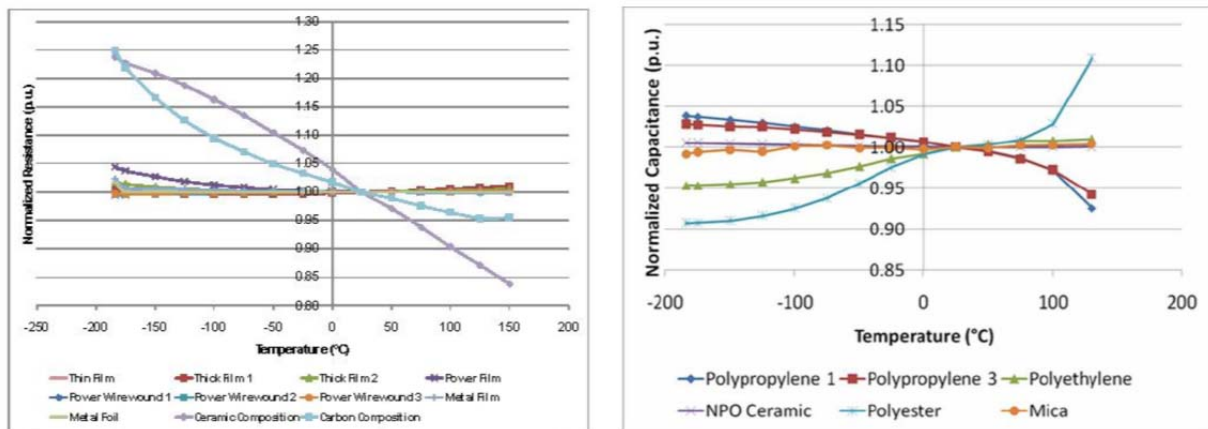
**Fig. 16 Voltaje directo vs. Temperatura**

Los mismos investigadores John Garrett, Roberto Schupbach, H. Alan Mantooth y Alexander B. Lostette también realizaron un estudio sobre las resistencias a bajas temperaturas. En él se investigaron 6 tipos de tecnologías de resistencias diferentes, como son thick film (película gruesa), thin film (película delgada), metal film (película metálica), metal oxide (óxido metálico), vitreous enamel (metal vidriado), and metal foil (hoja metálica). De estos estudios podemos decir que la mayoría de las tecnologías sufren pequeñas variaciones en sus valores de resistencia cuando alcanzan temperaturas criogénicas menos thick film y de metal oxide que sufren una variación mayor, como se puede observar en la siguiente figura.



**Fig. 17 Resistencia normalizada (p.u.) vs. Temperatura**

Otro estudio que también realiza pruebas a resistencias a temperaturas criogénicas lleva el título de “*Ultra-Wide Temperature (-230 OC to 130 °C) DC-Motor Drive with SiGe Asynchronous Controller*”. En él se estudian 7 tipos de resistencias como son, thin film (película delgada), thick film (película gruesa), metal foil (hoja metálica), metal film (película metálica), wirewound (hilo bobinado), carbón film (película de carbón) y ceramic composition (composición cerámica). Las pruebas a las que se las ha sometido son comparar su resistencia con respecto a la temperatura y el comportamiento de su resistencia después de un ciclo térmico de altas y bajas temperaturas.



**Fig. 18 a) Variación de resistencia vs. Temperatura. b) Variación capacidad vs. Temperatura**

En este mismo estudio también realizan pruebas a condensadores, que consisten en comprobar el cambio que sufre la capacidad de los condensadores después de realizar un ciclo térmico para altas y bajas temperaturas y ver la variación de la capacidad con respecto a la temperatura (figura 18 b). Se han estudiado 5 tipos de condensadores distintos de diferentes compuestos como son, polipropileno, polietileno, NPO cerámico, poliéster y mica.

Un estudio llamado “*Electronic components and systems for cryogenic space applications*” en el que se realizan pruebas a condensadores que se basan en comparar como varía la capacidad de los mismos según va descendiendo la temperatura en el rango de temperaturas de 25 °C a -190 °C. Se estudian tres tipos de condensadores distintos como son, los de Mica, los de Tántalo sólido y los electrolíticos de Tántalo. La siguiente figura muestra los resultados obtenidos.



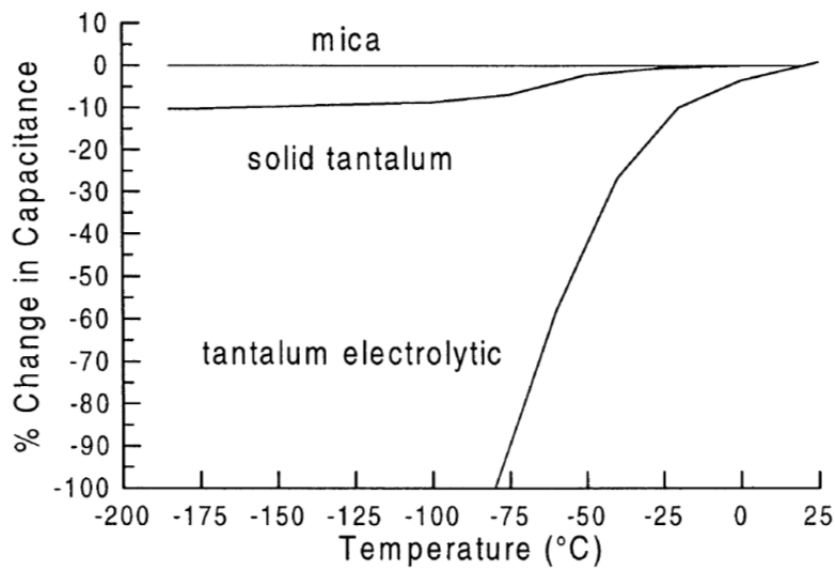


Fig. 19 Porcentaje de cambio de Capacidad en función de la temperatura

También existe un estudio llamado “*Cryogenic applications of commercial electronic components*” en el que las pruebas en vez de ser realizadas con nitrógeno líquido (77 K) son realizadas con Helio líquido (4,2 K). Estas siguen siendo temperaturas criogénicas y nos pueden ayudar a saber el comportamiento de las resistencias y condensadores que son los componentes electrónicos probados en este estudio. Empezaremos hablando de los condensadores, en este estudio se utilizan de 0,1  $\mu\text{F}$  y de diferentes dieléctricos (porcelana, alúmina, cuarzo) pero lo que sucede con todos ellos es muy parecido, ya que, cuando trabajan a la temperatura de 4,2 K bajan su valor de capacidad a aproximadamente 0,005  $\mu\text{F}$ . Esta bajada en la capacidad es debida al cambio de la permitividad dieléctrica con respecto a la temperatura que sufren los condensadores. Aunque baje el valor de la capacidad de los condensadores, estos siguen funcionando sin problema. Para el caso de las resistencias se utilizan tres tipos, como son metal film (resistencias de película metálica), thick film y thin film, que son resistencias de película gruesa y película delgada respectivamente. Con las resistencias de metal film no se puede acabar los ensayos a las temperaturas de 4,2 K, ya que dejan de funcionar correctamente. Para las resistencias de thick film y thin film su valor de la resistencia varía muy poco y su funcionamiento a esas temperaturas es el correcto.

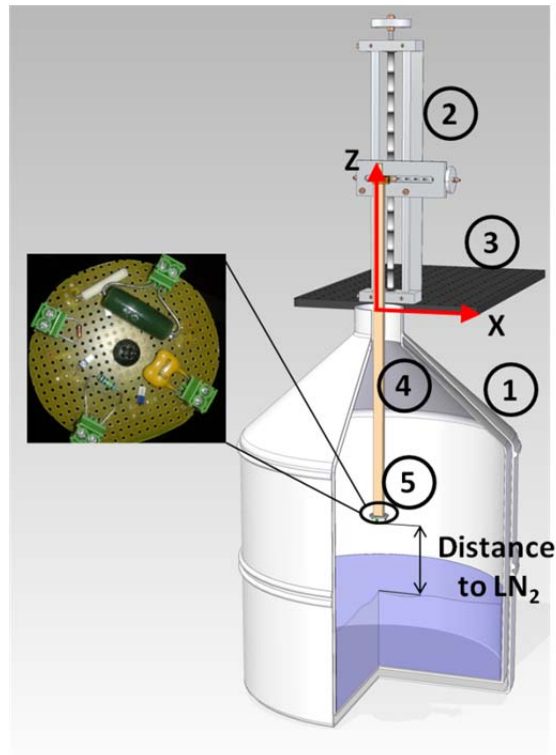


### **3. ESTUDIO EXPERIMENTAL**

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este estudio es caracterizar el comportamiento de los componentes pasivos según va descendiendo la temperatura a la que trabajan para poder determinar cuáles son los componentes electrónicos de uso convencional que mejor rendimiento proporcionan en el rango de temperaturas de 25°C a -196°C y poder abaratar los costes de los circuitos que puedan trabajar en condiciones criogénicas.

### 3.1 SET UP DEL EXPERIMENTO

En la fig. 20, se muestra un esquema del set up del experimento, en el que se detallan a grandes rasgos los diferentes elementos de los que está compuesto así como el sistema de referencia empleado en el mismo.



**Fig. 20** Esquema del set up del experimento. 1) Vaso dewar; 2) Mecanismos de posicionamiento XZ; 3) Sistema de referencia XZ; 4) Acople de madera 5) placa de circuito impreso con componentes electrónicos pasivos

En primer lugar, el dewar se llena de nitrógeno líquido pero para que el ensayo se realice en las mejores condiciones se ha comprobado que el nivel del nitrógeno líquido tiene que llegar entre los 23 cm y los 27 cm de la parte alta de la boca del dewar. Con esto lo que conseguimos es que la variación del gradiente de temperatura sea bastante estable y constante, y así, poder caracterizar mejor el comportamiento de los componentes.

Una vez acondicionado el LN<sub>2</sub> en el dewar, colocaremos la mesa 3D encima de una mesa de ensayo del laboratorio, sujetándola y alineándola con cuidado con la boca

del dewar. Por último, se coloca el acople de madera que va sujeto mediante una abrazadera, y en la punta del mismo, la placa de sensores Pt100 y los componentes electrónicos que queramos medir. En la placa que se ha añadido en uno de los extremos del acople se han colocado 5 sensores de temperatura PT 100, 4 de clase B de lámina metálica y 1 de clase A con certificado de fabricante para temperaturas criogénicas de hilo enrollado para comprobar si hay mucha variación entre unos sensores u otros y entre puntos contiguos del circuito electrónico según desciende por el interior del dewar. Además también se colocan 4 componentes electrónicos, por tanto en cada ensayo se realizan pruebas para 4 componentes distintos, normalmente 2 resistencias, 1 condensador y 1 diodo, todo esto se puede ver en la figura 27.

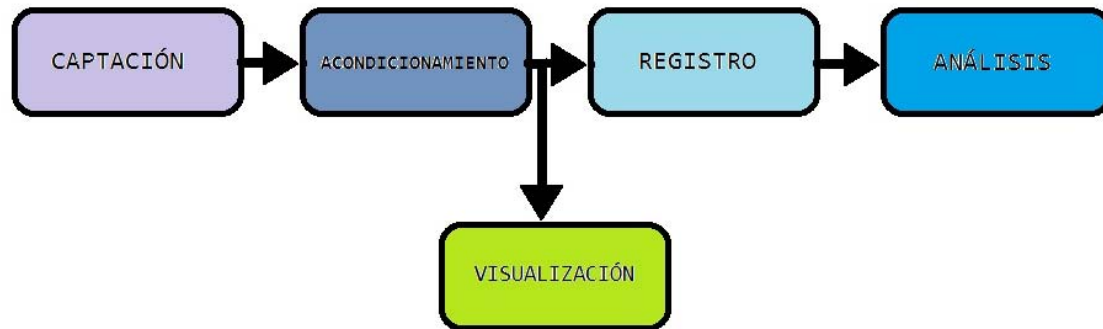
Una vez colocado todo hay que comprobar que el acople entre lo más perpendicular posible a la boca del dewar y que la placa que lleva sujeta en la punta no toque las paredes del dewar. También hay que revisar que la placa entre paralela a la boca del dewar para que no surja o se minimice al máximo los posibles errores por la variación del gradiente de temperatura por desplazamiento lateral y vertical.

Tras haberse realizado todas las conexiones y comprobaciones, se procede a hacer descender el circuito electrónico por el interior del Dewar con ayuda de la mesa 3D, disminuyendo la distancia entre estos y la superficie del nitrógeno líquido. Los desplazamientos verticales y horizontales se realizan con la mesa 3D que nos proporciona 3 grados de libertad con los que desplazar el acople en la dirección que necesitemos.

### **Cadena de medida**

Una cadena de medida vendría a ser una serie de elementos de un instrumento de medida o de un sistema de medida que constituye el camino que recorre la señal de medida desde la entrada hasta la salida de la misma.

La figura simboliza un ejemplo del esquema de una cadena de medida.



*Fig. 21 Cadena de medida*

### CAPTACIÓN.

Se utilizan sensores de temperatura comerciales RTD. Específicamente se usan PT100 de clase B que se ajustan a la norma DIN IEC 751. Este dispositivo, es un transductor eléctrico, ya que, transforma una señal o medida de la resistencia eléctrica del platino en una señal de temperatura, mediante su función de transducción. Para conseguir la finalidad de este proyecto, como se podrá observar más adelante, una de las primeras pruebas y comprobaciones que se hicieron fue asegurarse de la validez de estos sensores, ya que, según el fabricante y su hoja de especificaciones no estaban diseñados explícitamente para trabajar a temperaturas de funcionamiento tan bajas y tampoco criogénicas. Pero a pesar de esto, y como podremos comprobar más adelante, después de las comprobaciones y pruebas realizadas a estos dispositivos se puede decir que son aceptablemente precisas para nuestro proyecto.

### ACONDICIONAMIENTO Y REGISTRO.

Los valores de las medidas de la resistencia fueron tomadas con un polímetro digital de alta resolución, en torno, al 1% de la medida. Los resultados fueron tomados de forma manual por medio del investigador.

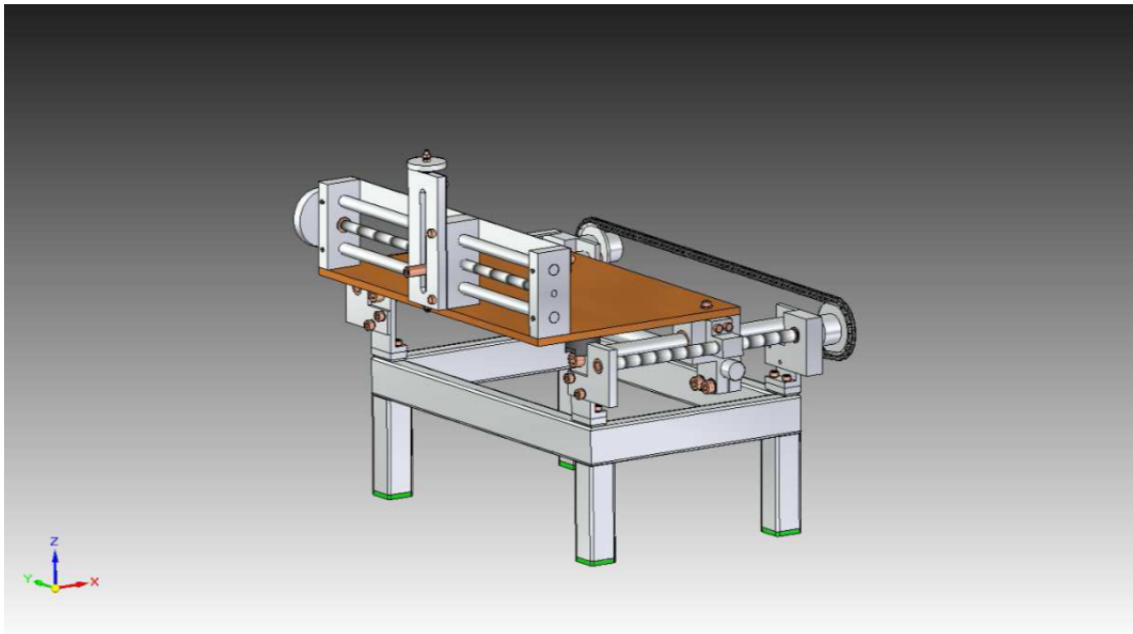
### ANÁLISIS.

Los valores y datos fueron registrados, manipulados y guardados en Microsoft Excell y Word 2010.

## 3.2 EQUIPOS Y COMPONENTES

### MESA 3D:

La mesa tiene la característica de poder desplazarnos en tres grados de libertad. Gracias al diseño y a la simetría de revolución del Dewar, el desplazamiento en la dirección X puede ser pasado por alto. Con este aparato, se puede cambiar y mover la posición de las PT 100 dentro del Dewar, para poder saber si existe variación según diferentes desplazamientos.



*Fig. 22 Representación CAD de la mesa 3D.*

Se puede ver, en la Fig. 23, como es el sistema de sujeción de la mesa 3D, que es sencillo y de uso fácil y como colocamos el acople para conseguir posicionarlo de la manera correcta. También, podemos observar la vista en planta de la mesa 3D. La resolución de la misma es de 0,05cm.



*Fig. 23 Vistas de la mesa 3D.*

#### VASO DEWAR:

Un Dewar de 32 litros de capacidad para almacenamiento de nitrógeno líquido en las mejores condiciones de seguridad y contra la pérdida por evaporación del mismo. El nivel de nitrógeno líquido se mide sistemáticamente al iniciar cada ensayo, ya que, es necesario que el nivel del mismo sea igual o muy parecido en todos los ensayos.



*Fig. 24 Vaso Dewar del experimento*

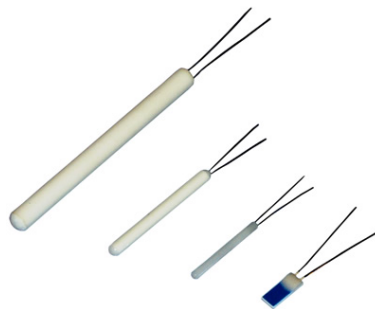
En el Anexo I de este trabajo se detallan las recomendaciones de seguridad para poder manejar nitrógeno líquido.

**SENSORES DE TEMPERATURA (sondas de temperatura):**

Se han elegido sensores PT100 de clase B para obtener la medición de temperatura dentro del Dewar, conforme al estándar DIN IEC 751. Dichos sensores nos dan una gran versatilidad gracias a su gran rango de trabajo, su reducido tamaño y su buen comportamiento y resistencia en el medio al que van a ser expuestos, además, de la mínima degradación que van a sufrir en dicho medio. La precisión que nos proporciona el fabricante de la medida se puede observar en la Tabla 4. También el fabricante nos facilita el error máximo permitido en la medida, que se puede obtener con la ecuación 1:

$$\varepsilon [^{\circ}\text{C}] = \pm 0.3 + 0.005(T)$$

*Ecuación 1. Error admitido para Pt100 clase B según DIN IEC 751*



**Fig. 25 Diferentes sondas de temperatura Pt100**

Las propiedades facilitadas por el fabricante se recogen en el Anexo II de este trabajo.

**TOLERANCIAS DE LA Pt100**

Temp. °C	Clase B 0,30+0,005*   t   (°C)		Clase A 0,15+0,002*   t   (°C)		Clase 1/3B 1/3* (clase B) (°C)		Clase 1/10B 1/10* (clase B) (°C)	
	Ohm	°C	Ohm	°C	Ohm	°C	Ohm	°C
-200	±0,56	±1,30	±0,24	±0,55	±0,19	±0,43	±0,06	±0,13
-100	±0,32	±0,80	±0,14	±0,35	±0,11	±0,27	±0,03	±0,08
0	±0,12	±0,30	±0,06	±0,15	±0,04	±0,10	±0,01	±0,03
100	±0,30	±0,80	±0,13	±0,35	±0,10	±0,27	±0,03	±0,08
200	±0,48	±1,30	±0,20	±0,55	±0,16	±0,43	±0,05	±0,13
300	±0,64	±1,80	±0,27	±0,75	±0,21	±0,60	±0,06	±0,18
400	±0,79	±2,30	±0,33	±0,95	±0,26	±0,77	±0,08	±0,23
500	±0,93	±2,80	±0,38	±1,15	±0,31	±0,93	±0,09	±0,28
600	±1,06	±3,30	±0,43	±1,25				
650	±1,13	±3,55	±0,46	±1,45				
700	±1,17	±3,80						
800	±1,28	±4,30						
850	±1,34	±4,60						

t = temperatura °C

**Tabla 5. Tolerancias máximas para las clases de Pt 100**

Los sensores utilizados en este proyecto tienen un tamaño reducido, tan solo 2,3 mm de longitud, lo que permite una precisión muy aceptable en el desplazamiento y también una inercia térmica muy pequeña, lo que da lugar, a una respuesta rápida y fiable por parte de los sensores.

### MULTIMETRO:

Se utiliza un polímetro marca ICE, modelo MD5600. El multímetro se encontraba dentro de su periodo de correcta calibración. Tiene una característica fundamental por la cual se ha elegido este modelo que es que nos permite medir la capacidad de los condensadores.

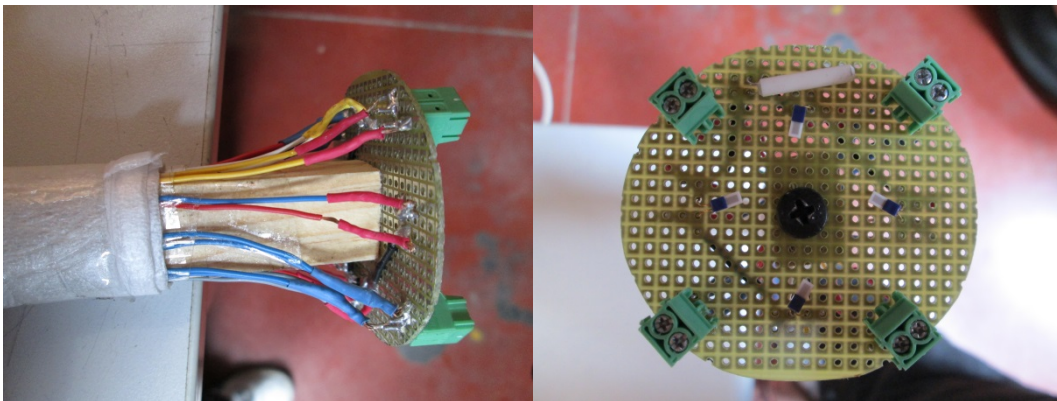


**Fig. 26 Multímetro digital empleado en los ensayos.**

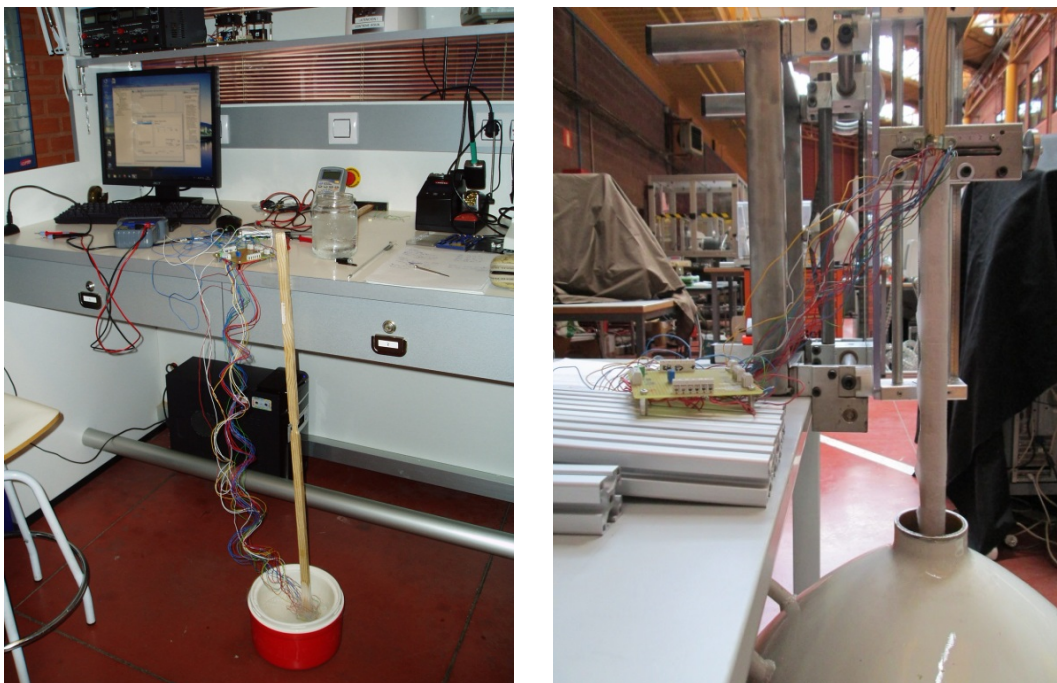


ACOUPLE:

Se ha elegido un dispositivo de madera porque nos permite un correcto y eficaz desplazamiento del sensor dentro del Dewar. Se selecciona madera por su baja conductividad térmica, que nos ayudará a reducir la evacuación de calor a través del listón. Las medidas esperadas de conductividad térmica serán aproximadamente entre  $1 \cdot 10^{-1}$  y  $3 \cdot 10^{-1}$  W/cmK para el rango de temperaturas en el que se va a realizar el estudio.



*Fig. 27 Acople de madera y pieza para la colocación de componentes y Pt 100.*



*Fig. 28 Vista de las primeras pruebas y Montaje final*

TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS:

Tarjeta de adquisición de datos NI-6008 de 12 bits y 10KS/s de la marca National Instruments con la que adquirimos todos los datos para medir los valores de voltaje e intensidad del montaje a 4 hilos de los sensores de temperatura Pt 100 para después convertiros en valores de resistencia. Para ello también se necesita un ordenador al que conectar la tarjeta de adquisición de datos.



*Fig. 29 Tarjeta de adquisición de datos NI-6008.*

### **3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.3.1 Procedimientos de ensayo**

A continuación expondremos como se han realizado los ensayos, la metodología utilizada y los pasos que se han ido siguiendo para la obtención de las medidas.

En primer lugar, se procederá a colocar en una mesa del laboratorio, con un ordenador en la misma, todos los aparatos y componentes que son necesarios para realizar las pruebas. Estos aparatos son un ordenador al que conectaremos una tarjeta de adquisición de datos con la cual conseguiremos registrar los valores del voltaje y de la intensidad. Después conectaremos a la tarjeta de adquisición los cables del acople que utilizaremos para poder ir variando la temperatura a la que vamos midiendo. El siguiente paso sería colocar y sujetar dicho acople a la mesa 3D, la cual nos va a permitir saber con precisión cuanto nos desplazamos, y así, poder relacionarlo con la temperatura a la que están los componentes. Por último, colocaremos el dewar debajo de la mesa 3D en el que el acople tiene que ir entrando hasta conseguir que los componentes estén en contacto directo con el nitrógeno líquido.

Una vez colocado y conectado todo, fijaremos las señales de entrada que se realiza mediante una fuente de alimentación externa que nos proporciona 5V de tensión constante. Con esta tensión alimentamos los componentes electrónicos que queremos medir, fijándola como tensión de entrada del montaje a 4 hilos que hemos realizado, mientras que por medio de la tarjeta de adquisición alimentamos las sondas Pt100. El montaje a 4 hilos nos permite saber la tensión de salida en cada una de las Pt100, que registramos mediante el programa de ordenador de la tarjeta de adquisición. También nos permite saber la intensidad constante que pasa por el circuito, que medimos mediante un multímetro. Con la tensión en cada una de las Pt100 y la corriente que circula por el circuito conseguiremos saber la resistencia de cada pt100 en cada momento. Una vez que calculamos la resistencia de cada sensor podemos saber la temperatura a la que están cada uno de los componentes mediante una ecuación de interpolación cubica, que más adelante explicaremos. Para medir los valores que nos

van dado los componentes ensayados utilizamos un polímetro, con el que mediremos la capacidad, la resistencia o el voltaje según corresponda.

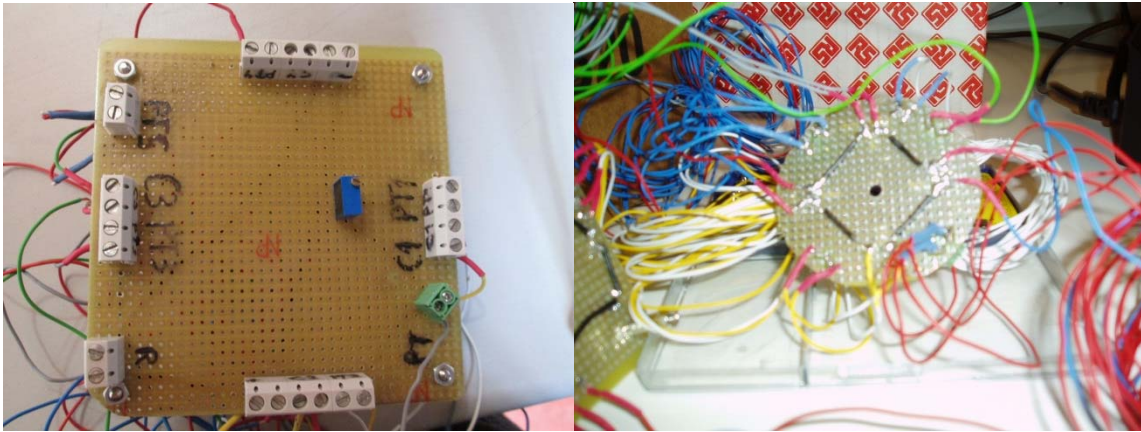
La metodología utilizada una vez colocado y conectado todo consiste en empezar a coger medidas cada 2 minutos de la intensidad, el voltaje, la resistencia y la capacidad en el mismo punto o a la misma altura en el eje Z. Después se cambia de altura bajando unos centímetros el acople. La cantidad de centímetros que se varía será entre 2 y 5, ya que se ha comprobado que es el mejor método para poder caracterizar el comportamiento de los componentes sin que haya grandes saltos. Continuaremos realizando medidas bajando de altura hasta que consigamos llegar a que los componentes se sumerjan en el nitrógeno líquido. Cuando esto suceda y hayamos realizado todas la medidas a esa altura, sacaremos el acople del dewar y cambiaremos los componentes a ensayar y empezaremos de nuevo el proceso.

### **3.3.2 Calibración de los sensores**

Se empezará con la realización de pruebas de comprobación del funcionamiento de las sondas de temperatura y con la calibración de las mismas.

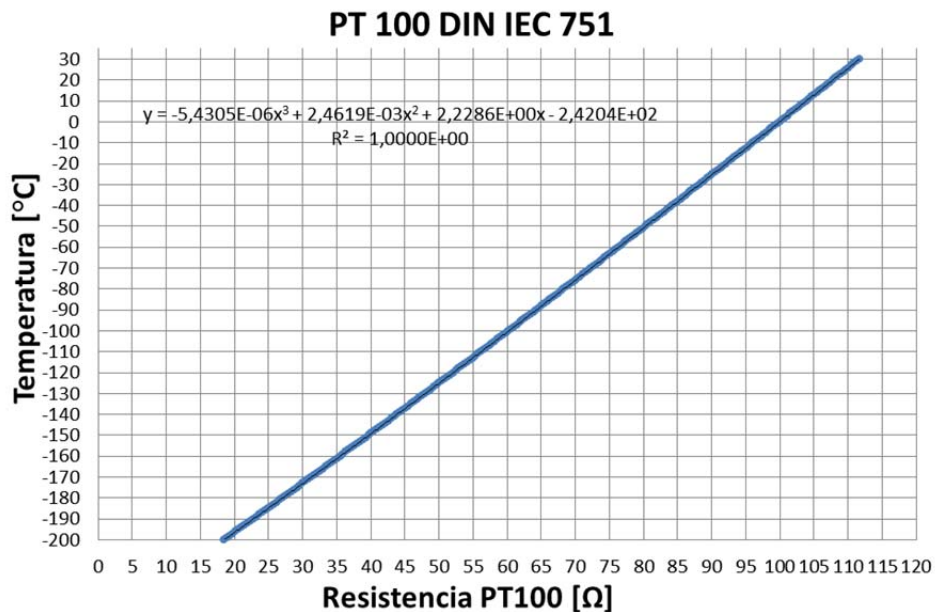
#### **SENSORES DE TEMPERATURA PT 100**

En un primer Set-up, se comprobó que el error en la medida de temperatura podía llegar hasta  $\pm 8^{\circ}\text{C}$ . El motivo de este error, se produjo probablemente debido a un mal conexionado eléctrico de las sondas de temperatura. Debido a esto, se trabajó para mejorar las conexiones, por ejemplo, soldando los cables de conexión a las Pt-100, creando dos soportes uno para la toma de medidas en el cual se soldaron todas las conexiones, y para ayudar a las toma de medida y conexiones se soldaron clemas en las placas para que los cables se conexionaran por medio del cierre del tornillo. El otro soporte, se fabricó para la colocación de los componentes y las sondas de temperatura en la punta del acople de madera, en el cual van soldados para evitar su movimiento y para mejorar sus conexiones.



**Fig. 30** Vista del conexionado de los soportes añadidos al acople

La transducción de las medidas de la resistencia obtenidas en temperatura a través de las PT 100 será realizada por medio de las tablas de conversión de la DIN IEC 751. Para ello se procede a coger valores cada grado de variación de temperatura en un rango de +30°C a -200°C. En la Fig. 31, se representan los valores de la DIN y una función de interpolación cúbica, ya que con ella conseguimos mucha más precisión para averiguar los posibles errores.

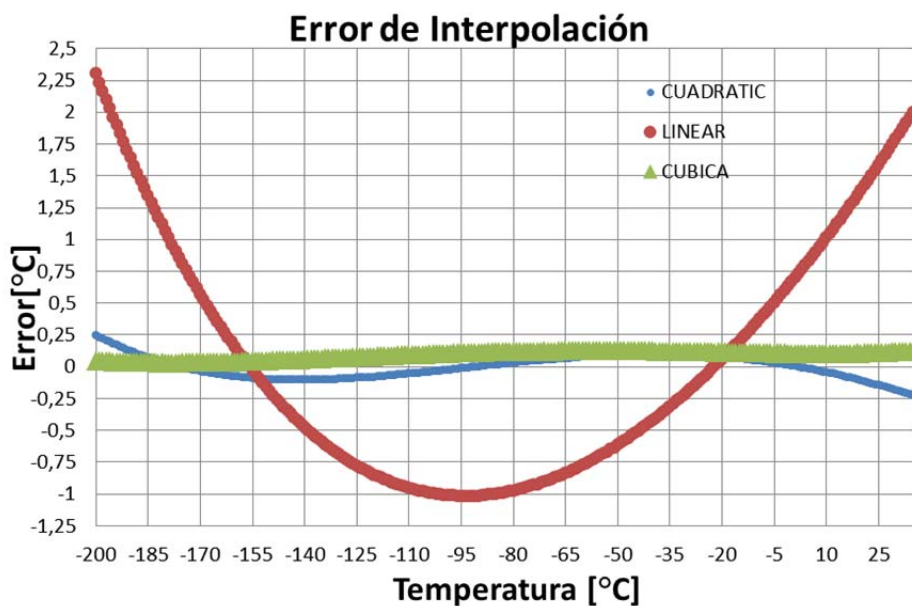


**Fig. 31** Interpolación cúbica para valores DIN de transducción R-T

Por consiguiente, es imprescindible elegir una función de interpolación adecuada, que en nuestro caso hemos elegido una interpolación cúbica para intentar reducir al máximo los posibles errores.



El error sistemático de método cometido con respecto a los valores de la norma DIN IEC751 comparados con las distintas funciones de interpolación utilizadas se pueden observar en la Fig. 32. La curva verde representa la desviación usando una función cúbica. La azul, representa la desviación de la función cuadrática. Y la roja la de una función lineal.



**Fig. 32** Desviación relativa a tabla DIN según la función de interpolación.

Sabiendo que la incertidumbre que pueden admitir las PT100 categoría B acordes a la norma DIN IEC 751 tiene como máximo valor  $\pm 1.3^{\circ}\text{C}$  en el rango de temperaturas que se va a trabajar en este proyecto, se ha tomado la decisión de utilizar la interpolación cúbica para no propiciar un nuevo frente de posibles errores.

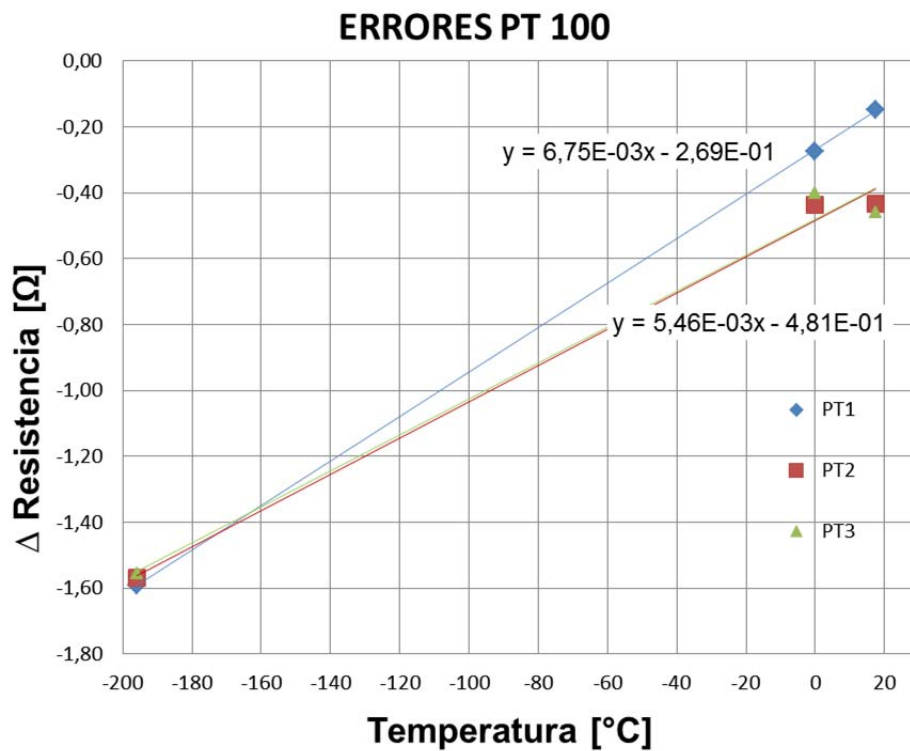
$$T = 0,0000054305 \cdot R^3 + 0,0024619 \cdot R^2 + 2,2286 \cdot R - 242,04$$

Se decidió realizar la instalación a cuatro hilos para compensar el efecto de las conexiones de los cables a las PT100, de igual forma a lo observado en la Fig. 11. Por consiguiente, la resistencia que los cables de conexión nos introducen no hace falta tenerla en cuenta y la podremos despreciar, y así, conseguir unos valores más precisos.

También, se revisó y comprobó que los dispositivos utilizados para las conexiones y las soldaduras realizadas no influyeran significativamente en la resistencia del circuito teniendo muy en cuenta la precisión del instrumento de medida.

De forma paralela, se procedió realizar una calibración a tres puntos de las sondas de temperaturas. Las medidas de la temperatura obtenidas para dicha calibración fueron:

- 1)  $17.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$ : La temperatura ambiente en el momento de la calibración.
- 2)  $0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ : La temperatura de fusión del hielo a presión de 1 bar.
- 3)  $-195.8^\circ\text{C}$ : La temperatura del nitrógeno líquido a presión de 1 bar.



*Fig. 33 Calibración a tres puntos y sus errores para sensores PT 100*

Las temperaturas anteriores fueron tomadas por medio de un termómetro de mercurio de precisión  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ , menos la del nitrógeno líquido, la cual fue asumida teniendo en cuenta la presión atmosférica en el momento de la toma de la medida.

Los valores promedio de 3 medidas independientes y compensados mediante tres PT100 distintas aunque idénticas a las utilizadas en el proyecto fueron:

Temperatura [°C]	R <sub>Pt-100 1</sub> [Ω]	R <sub>Pt-100 2</sub> [Ω]	R <sub>Pt-100 3</sub> [Ω]
17.4	106.57	106.58	106.69
0	99.90	99.83	99.85
- 195.8	19.71	19.72	19.73

*Tabla 6. Valores promedio medidos de resistencia en tres sensores*

Después se procede a compensarlas, y los valores de resistencia se pasan a valores de temperatura usando una función cúbica de interpolación, que son:

Temperatura [°C]	R <sub>Pt-100 1</sub> [°C]	R <sub>Pt-100 2</sub> [°C]	R <sub>Pt-100 3</sub> [°C]
17.4	17.25	16.97	16.94
0	-0.27	-0.44	-0.40
- 195.8	-197.39	-197.37	-197.36

*Tabla 7. Valores de temperatura equivalentes a la tabla 6.*

El error estimado respecto de la temperatura de calibración del termómetro es:

Temperatura [°C]	R <sub>Pt-100 1</sub> [Ω]	R <sub>Pt-100 2</sub> [Ω]	R <sub>Pt-100 3</sub> [Ω]	Error IEC 751 CLASS B[°C]
17.4	-0.15	-0.43	-0.46	±0.39
0 (Error de cero)	-0.27	-0.44	-0.40	± 0.3
- 195.8	-1.59	-1.57	-1.56	± 1.28

*Tabla 8. Error estimado respecto temperatura real.*

Debido a la cercanía de los errores obtenidos con respecto a la incertidumbre asociada a esta clase de sondas, se demuestra que los sensores utilizados para los ensayos y el proyecto tienen total validez y se toma la decisión de emplear una función de transferencia polinómica de grado tres aplicándola con los valores discretos dados por la norma DIN IEC 751.



Se decide no hacer la calibración completa de los sensores porque el error estimado es mayor de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  que es la incertidumbre que cometemos con la recta cúbica. Por tanto, los errores en la medida de temperatura se deciden acotar en  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Se toma la decisión de utilizar el doble del valor más alto de incertidumbre obtenido para tratar de compensar los errores accidentales y sistemáticos del ensayo. El error estimado, representa menos del 1.5% del fondo de escala.

Así pues, la temperatura queda expresada como:

$$T = (0,0000054305 \cdot R^3 + 0,0024619 \cdot R^2 + 2,2286 \cdot R - 242,04) \pm 3[^{\circ}\text{C}]$$

*Ecuación 2. Función de transferencia R-T.*

Siendo R la medida de la resistencia en cualquiera de las Pt-100 del experimento.

### CUANTIFICACION DE INCERTIDUMBRES

- **Multímetro:**

El multímetro empleado es un instrumento digital, y por tanto, tiene una resolución de 1%. Según el fabricante, la precisión en la medida es siempre menor a la resolución. Esto fue verificado, a través, de obtención de distintas medidas de diferentes componentes electrónicos de valor conocido.

$$\varepsilon = \pm 1\%$$

- **Medidas de posicionamiento:**

El error asociado con respecto al control de la posición se estima, ya que, se utiliza un instrumento analógico.

$$\varepsilon = \pm 0.5 \text{ mm}$$

- **Medidas de temperatura:**

El error acumulado en la temperatura medida y obtenida por los sensores PT100 ha sido estimado, sabiendo los errores asociados a las sondas y la instrumentación de las mismas.

$$\varepsilon = \pm 3^{\circ}\text{C}$$

### **3.4 PERFIL DE TEMPERATURAS**

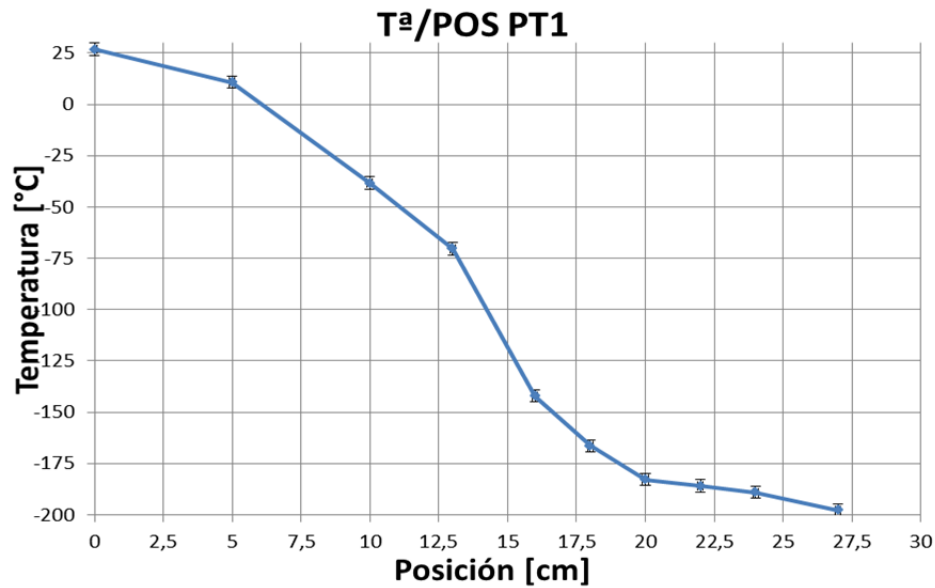
En la siguiente tabla se especifica los tipos de sensores Pt100 que se han utilizado y el nombre que se le ha dado a cada uno de ellos en los diferentes ensayos realizados.

<b>Nombre del sensor en el ensayo</b>	<b>Tipo de sensor</b>
PT1	Sensor Pt100 RTD lámina metálica clase B con coeficiente de temperatura máximo de $0.00385 \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$
PT2	Sensor Pt100 RTD lámina metálica clase B con coeficiente de temperatura máximo de $0.00385 \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$
PT3	Sensor Pt100 RTD lámina metálica clase B con coeficiente de temperatura máximo de $0.00385 \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$
PT4	Sensor Pt100 RTD lámina metálica clase B con coeficiente de temperatura máximo de $0.00385 \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$
PT5	Sensor Pt100 RTD Hilo enrollado clase A con coeficiente de temperatura máximo de $0.003923 \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$

**Tabla 9. Nombre y tipo de sensor Pt100 utilizados en los ensayos**

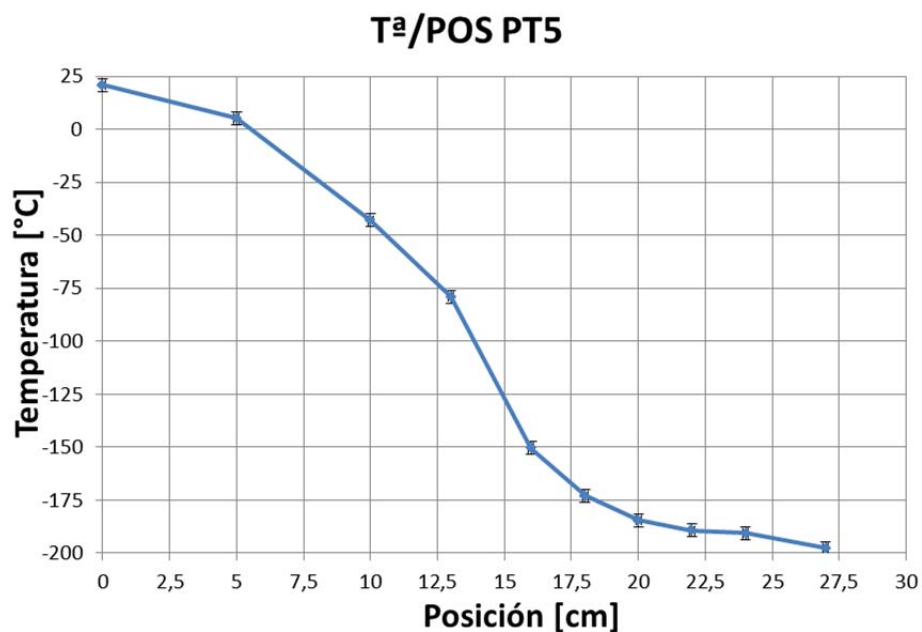
#### **3.4.1 POSICIÓN Z VS. TEMPERATURA**

En la figura 34, se muestran los resultados para una de las sondas de temperatura, en este caso la PT1, para un ensayo en el cual se varió la posición Z desde 0 cm a 27 cm divididos en tres partes, la primera de ellas se hacen tres medidas cada 5 cm, en la segunda parte se hacen dos medidas cada 3 cm y en la última parte se realizan medidas cada 2 cm. Se ha tomado este criterio porque lo que se quiere conseguir con el ensayo es ver el comportamiento de los componentes según va bajando la temperatura, y también, según la temperatura va siendo más extrema. Para cada uno de los puntos se registró la temperatura.



*Fig. 34 Posición Z vs Temperatura para PT1.*

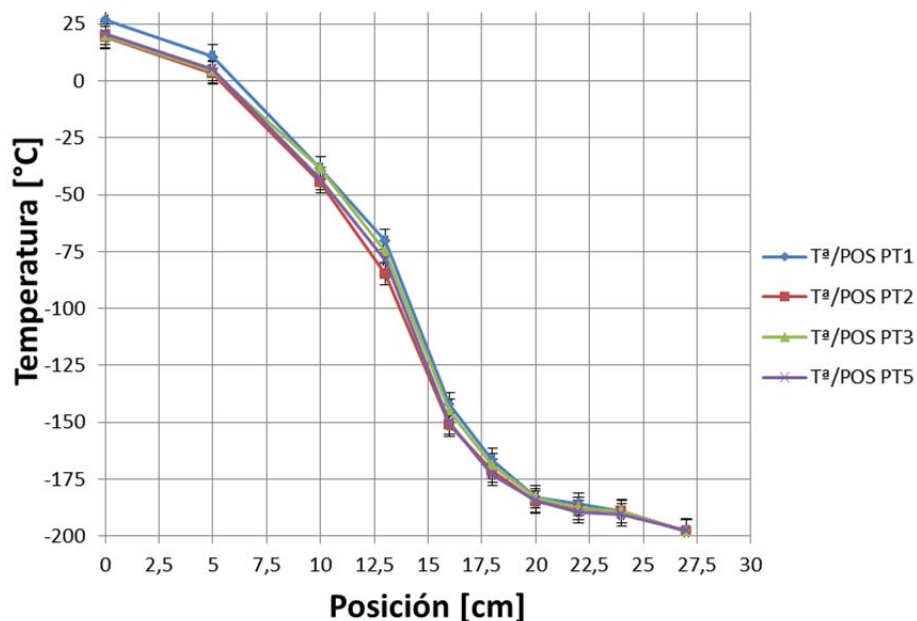
En la Fig. 35 se muestran los resultados para otra sonda de temperatura con mayor precisión, en este caso PT5, realizando el mismo ensayo con las mismas posiciones y condiciones que el realizado para la PT1. El ensayo para la PT5 y la PT1 se realiza a la vez, ya que, en la placa que se ajusta al acople hay 5 sondas integradas.



*Fig. 35 Posición Z vs Temperatura para PT5.*

Observando las figuras anteriores, se pueden sacar algunas conclusiones:

1. El gradiente vertical de temperaturas no es uniforme y depende altamente de la posición dentro de la carrera de desplazamiento del sistema de medida. Se puede concluir que la variación de temperatura es menos pronunciada en los extremos del Dewar.
2. Se puede observar que la variación entre las dos sondas es muy pequeña y que las dos describen una curva muy parecida, dándonos a entender que la sonda de menos precisión y más barata tiene un buen rendimiento, y por tanto, nos compensa utilizar este tipo de sondas, ya que, son mucho más económicas y nos ofrecen un rendimiento bueno.
3. También se puede ver que los posibles errores cometidos en las medidas, reflejados con las barras de errores en cada punto, no son muy grandes, entorno a  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Esto nos dice, que el valor exacto de cada punto no se verá muy afectado si tenemos en cuenta el rango de temperaturas que estamos midiendo. Por lo que podemos decir, que se ha conseguido un sistema de medida que cumple perfectamente con los errores máximos que se pueden cometer.



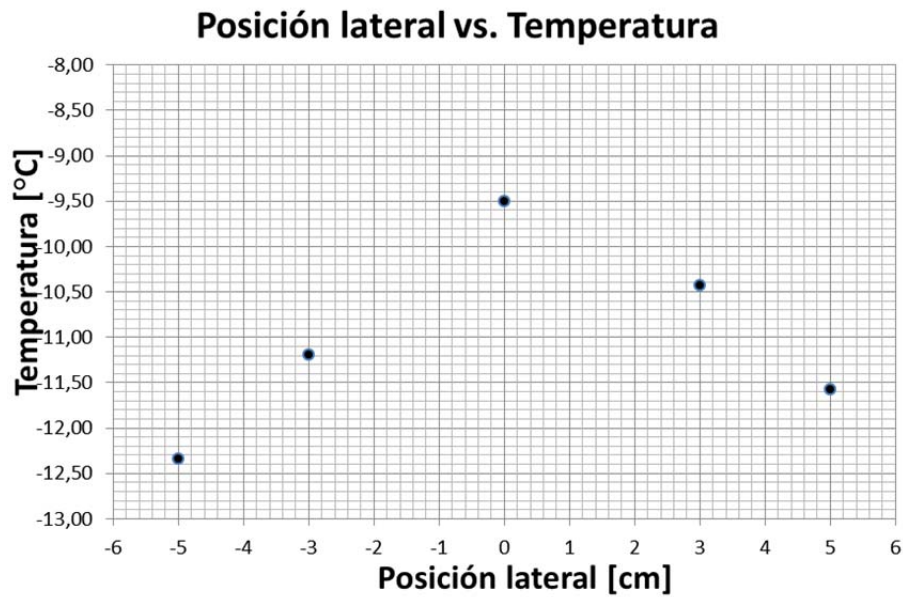
**Fig. 36 Posición Z vs. Temperatura de todas las PT100.**

Como se puede ver en la Fig. 36, todas las sondas PT 100 hacen una curva muy parecida, cometiendo en todas ellas más o menos el mismo error y sufriendo el mismo comportamiento. Lo que nos da a entender que para cualquier sensor PT 100 el resultado de las medidas siempre va a dibujar curvas con esta misma forma.

### **3.4.2 POSICIÓN Y VS. TEMPERATURA**

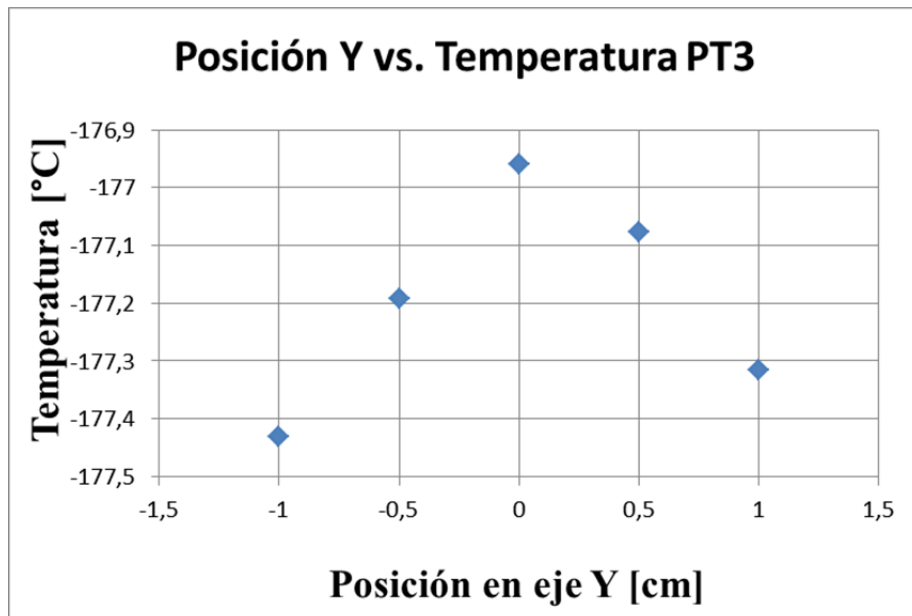
En los desplazamientos laterales la sensibilidad térmica es mucho menor que en el caso de los desplazamientos verticales. Como es lógico pensar, la sensibilidad térmica será igualmente menor para el eje X dada la simetría axial del sistema.

Para este apartado, se han realizado dos ensayos a temperaturas distintas para saber si el efecto del desplazamiento lateral hacia ambos lados es distinto dependiendo de la temperatura a la que se encuentren los componentes o si siempre se mantiene constante el posible error en cada una de las medidas. Para ello, en el primer ensayo, se realizan medidas en 0 cm, +3 cm, -3 cm, +5 cm, -5 cm en ese orden para una medida de temperatura en 0 cm de  $-9,5^{\circ}\text{C}$  y cada minuto la siguiente medición para cada distancia lateral acabando el valor de la temperatura en  $-12,35^{\circ}\text{C}$  para el desplazamiento lateral de -5 cm. Con esto podemos sacar como conclusiones, que el error cometido por el desplazamiento lateral se mantiene más o menos constante en todas las medidas. La diferencia en el valor de la temperatura de la primera medida a la última se debe sobre todo a que al empezar el ensayo no se respetó el tiempo de estabilización de las sondas de temperatura, y por eso, cada minuto que pasa entre medida y medida la temperatura baja debido sobre todo a que se está estabilizando. La figura 37, corresponde a este primer ensayo.

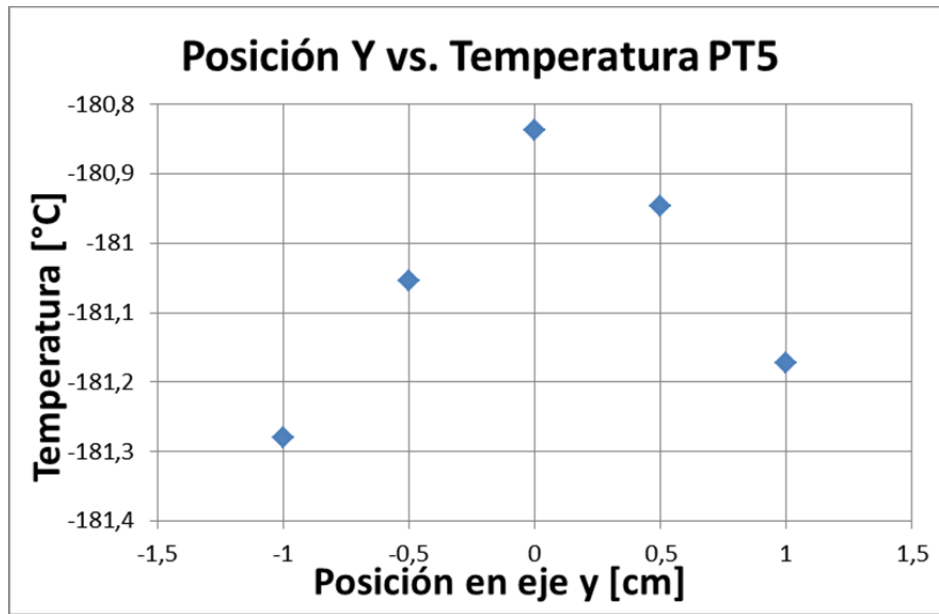


*Fig. 37 primer ensayo de posición lateral vs. Temperatura*

En el segundo ensayo realizado posteriormente se corrigen muchos de los errores de medida y se deja el tiempo necesario de estabilización de la temperatura. Esta vez se realiza a dos sensores de temperatura distintos, uno con mayor precisión que el otro, para comprobar si en el desplazamiento lateral la precisión de la sonda es determinante o no, comprobando que no es así, ya que, la sonda de menor precisión y más barata nos da un rendimiento prácticamente igual que la de mayor precisión, como se puede observar en la figura 38 y 39.



*Fig. 38 Posición Y vs. Temperatura para Pt 100 de menor precisión.*



*Fig. 39 Posición Y vs. Temperatura para Pt 100 de mayor precisión.*

También este segundo ensayo, se realiza a temperaturas mucho más bajas para también comprobar que la variación de las medidas de temperatura y los posibles errores cometidos, no influyen casi nada en el valor de la medida con respecto al desplazamiento lateral, dando lugar a poder despreciarlos a la hora de realizar el experimento debido a que están por debajo del mayor error permitido. El procedimiento para realizar este segundo ensayo es el mismo que el primero pero en esta ocasión se varía menos el desplazamiento lateral, ya que, en el primero se ve que la variación es más o menos constante dando igual la cantidad de centímetros que se desplacen lateralmente, dicho procedimiento es el siguiente: 0 cm, +0,5 cm, -0,5 cm, +1 cm, -1 cm. Viéndose que el error que se puede cometer es de más o menos 0,1°C.

### 3.4.3 TIEMPO VS. TEMPERATURA

Otro de los aspectos que hay que tener en cuenta para que los datos del experimento sean lo más exactos posibles y tengan un error homogéneo, es saber el tiempo en el que se estabilizada la temperatura. Este es, el tiempo que es necesario esperar para que la medida de temperatura deje más o menos de bajar o fluctuar y se mantenga constante.

En un primer ensayo, como se puede ver en la figura 40, el tiempo de estabilización es bastante grande, sobre 12 minutos, para que más o menos se estabilice la temperatura. Con estos resultados se ve que es conveniente mejorar el diseño, la colocación de los componentes y la sujeción de los mismos para que las sondas de temperatura puedan detectar con mayor rapidez los cambios en la temperatura.



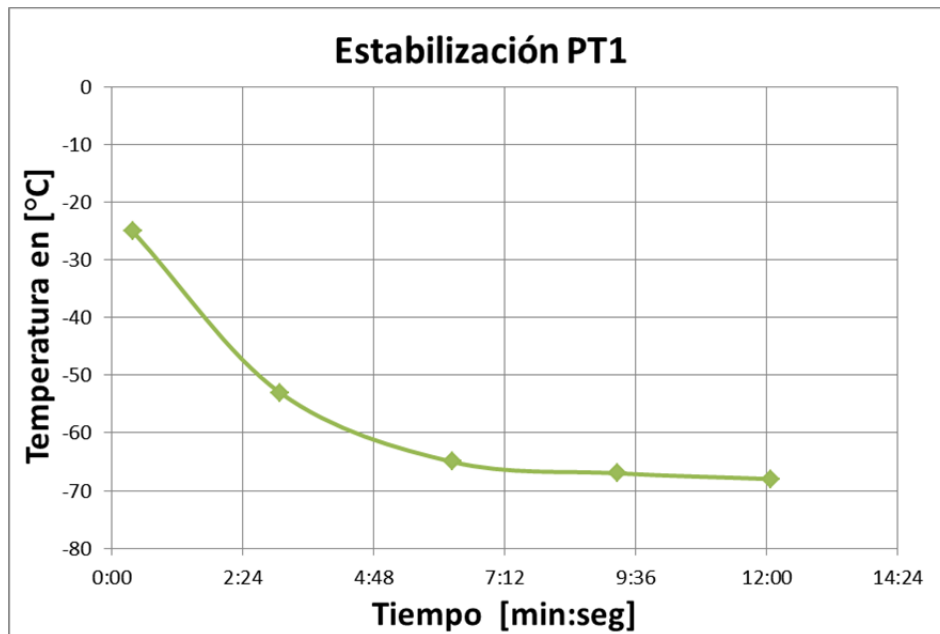
*Fig. 40 Tiempo vs. Temperatura primer ensayo.*

Las mejoras que se realizan son la colocación de un trozo circular de placa de circuito impreso en la punta del acople sujeta mediante un tornillo que es mucho mejor conductor de la temperatura que la madera, que era donde antes iban sujetas las sondas de temperatura. También se mejora la toma de medidas, ya que, se sueldan los cables de cada una de las sondas y de los componentes a otra placa de circuito impreso que hace que en las medidas se cometa un menor error, comprobando que la soldadura no nos añade resistencia en el cable.

En la figura 41, se puede ver que las mejoras realizadas en el diseño del experimento tienen un efecto positivo y reducen el tiempo de estabilización de la temperatura, dejándolo más o menos en la mitad, alrededor de los 6 minutos. A partir de



estos resultados se deja como tiempo de estabilización 6 minutos que será el tiempo que dejemos esperar para considerar que las medidas son aceptables.



*Fig. 41 Tiempo vs. Temperatura segundo ensayo.*

## **3.5 RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **3.5.1 TEMPERATURA VS. RESISTENCIA**

En este apartado, hablaremos de cómo cambia el valor de la resistencia de diferentes tipos de resistencias convencionales y de uso común, según va descendiendo el valor de la temperatura, sabiendo que cambios se producen en las mismas y si es conveniente utilizarlas en temperaturas criogénicas. Los tipos de resistencias que hemos estudiado son: película de carbón, película de Cu-cobre, composición cerámica, metal vidriado, hilo bobinado y película metálica. En la tabla 10, se detallan las características más importantes de las resistencias utilizadas como ejemplo en cada tipo. También se especifican el código de proyecto y de fabricante que tienen cada una de ellas.

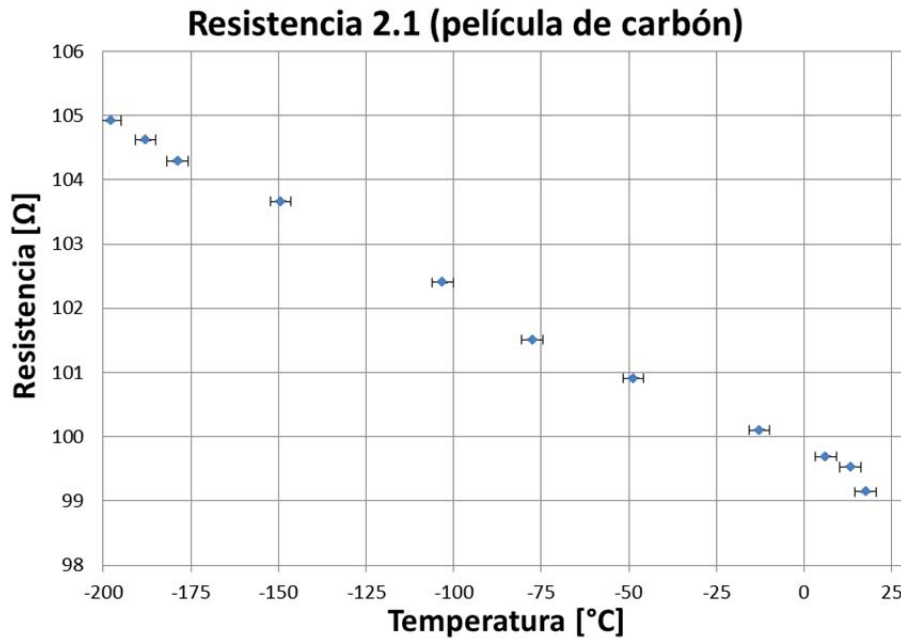
Componente	Resistencia	unidades	Tolerancia	Potencia	Min. Coef. Temperatura	Temperatura Min.[°C]	Tipo	Código fabricante	Código proyecto	Valor T <sup>a</sup> amb.	Valor T <sup>a</sup> LN2	Variación relativa
Resistencia	100	Ω	5%	0,5 W	-1200ppm/°C	-55	Película de carbón	132-258	2.1	99,2	104,6	5,16%
Resistencia	47	KΩ	5%	2 W	-250ppm/°C	-55	película de Cu-Cobre	683-5798	2.2	47,82	46,29	3,31%
Resistencia	10	Ω	10%	2 W	-900ppm/°C	-40	Composición cerámica	377-4906	2.3	9,99	11,36	12,06%
Resistencia	100	KΩ	5%	0,5 W	-200ppm/°C	-55	Metal vidriado	683-5284	2.4	99,01	105,86	6,47%
Resistencia	1	MΩ	5%	1 W	-200ppm/°C	-55	Metal vidriado	683-5313	2.5	0,999	1,061	5,84%
Resistencia	100	Ω	5%	0,25 W	-1200ppm/°C	-55	Película de carbón	135-774	2.6	99,3	104,7	5,16%
Resistencia	1	Ω	10%	7 W	-400ppm/°C	-55	Hilo Bobinado	206-0672	2.7	1	1,1	9,09%
Resistencia	100	Ω	0,10%	0,25 W	-15ppm/°C	-55	Película Metálica	701-7068	2.8	100,13	100,56	0,43%
Resistencia	1	Ω	1%	3/5 W	-100ppm/°C	-55	Película Metálica	150-565	2.9	1,2	1,1	9,09%
Resistencia	100	Ω	5%	2 W	-250ppm/°C	-55	Película Cu-Cobre	683-5685	2.10	98,4	96,6	1,84%
Resistencia	10	Ω	5%	7 W	-200ppm/°C	-55	Hilo Bobinado	159-376	2.11	10,19	10,02	1,70%
Resistencia	1	MΩ	1%	3/5 W	-50ppm/°C	-55	Película Metálica	149-228	2.12	1,0012	0,9914	0,99%

*Tabla 10. Características más importantes de las resistencias del ensayo.*

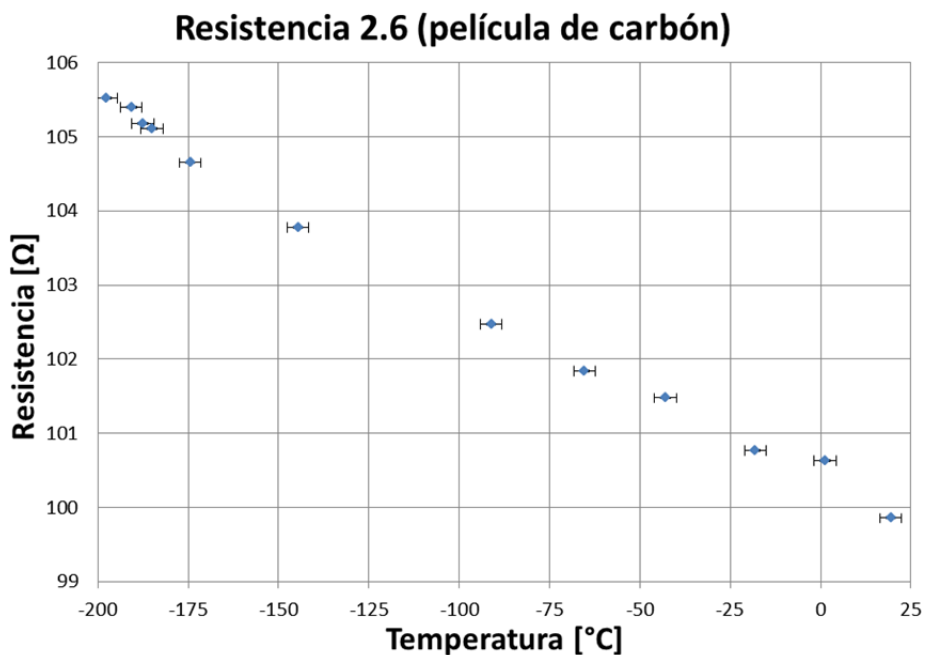
### **Resistencias de Película de Carbón**

Se han estudiado muchas resistencias de este tipo para diferentes valores, correspondientes a este ensayo y en todas se cumple aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se van a utilizar las

gráficas de dos resistencias que ofrecerán los resultados obtenidos en el ensayo con ellas y que se representan en las siguientes figuras.



*Fig. 42 Temperatura vs. Resistencia película de carbón 2.1.*



*Fig. 43 Temperatura vs. Resistencia película de carbón 2.6.*

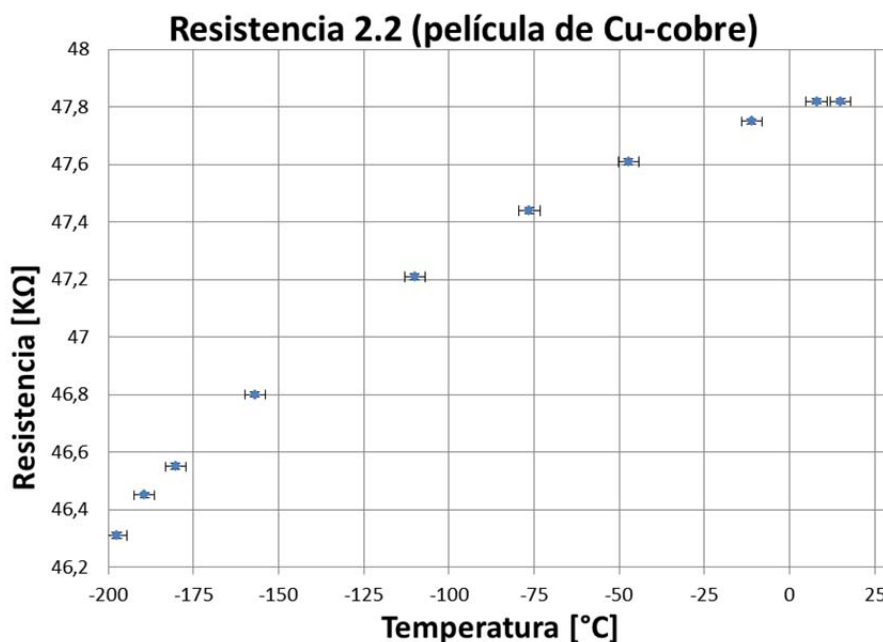
Como se puede ver en las figuras 42 y 43, la relación entre resistencia y temperatura es inversamente proporcional en el caso de las resistencias de película de carbón. La máxima variación es aproximadamente del 5% en ambos componentes para

el rango de temperaturas del ensayo. En ambas figuras, se puede ver como el comportamiento de este tipo de resistencias es bastante lineal en todo el rango de temperaturas realizadas en el ensayo.

Este tipo de resistencias no sufren ninguna variación en sus valores cuando se les realiza un ciclo térmico completo. Por tanto, podemos decir, que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

### **Resistencias de Película de Cu-cobre**

Se han estudiado muchas resistencias de este tipo de diferentes valores para este ensayo y en todas se cumple más o menos el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se va a utilizar la gráfica de una resistencia que ofrecerá los resultados obtenidos en el ensayo con ella y que se representa en la figura 44.



**Fig. 44 Temperatura vs. Resistencia película Cu-cobre 2.2.**

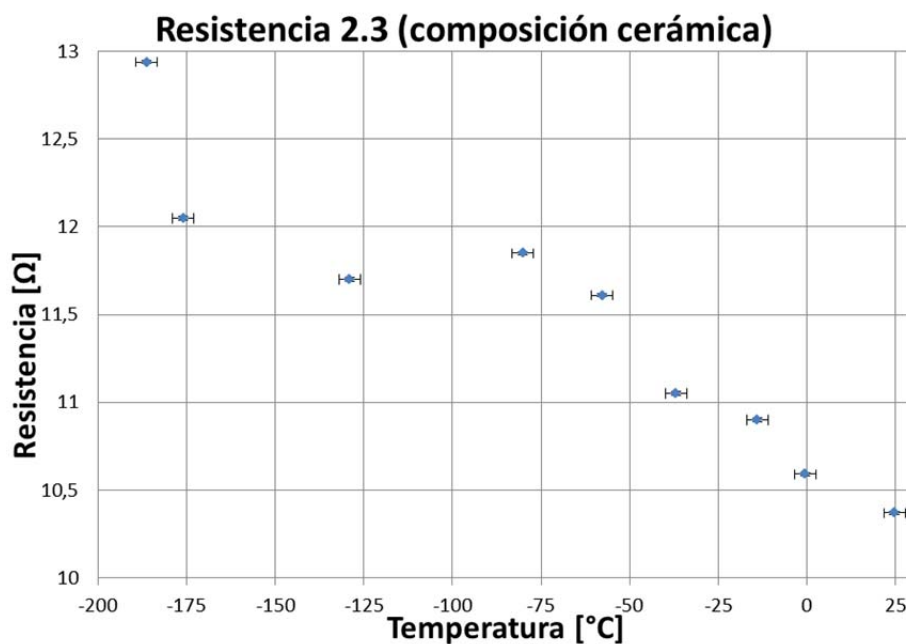
Como se puede ver en la figura anterior, la relación entre resistencia y temperatura es directamente proporcional en el caso de las resistencias de Cu-Cobre. La máxima variación observada es aproximadamente del 2,5% teniendo en cuenta todas las resistencias estudiadas. También se puede observar, que el comportamiento de este tipo

de resistencias es más o menos lineal en el rango de temperaturas practicadas en el estudio.

Este tipo de resistencias no sufren ninguna variación en sus valores cuando se les realiza un ciclo térmico completo. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

### **Resistencias de Composición Cerámica**

Se han estudiado muchas resistencias de este tipo para diferentes valores correspondientes a este ensayo y en todas se cumple más o menos el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se va a utilizar la gráfica de una resistencia que ofrecerá los resultados obtenidos en el ensayo con ella y que se representa en la figura 45.



*Fig. 45 Temperatura vs. Resistencia de Composición Cerámica 2.3.*

Como se puede ver en la figura 45, la relación entre resistencia y temperatura es inversamente proporcional en el caso de las resistencias de composición cerámica. La variación es superior 15% en la mayoría de las resistencias estudiadas de este tipo, siendo un margen de variación bastante grande. En la figura, se puede ver como el

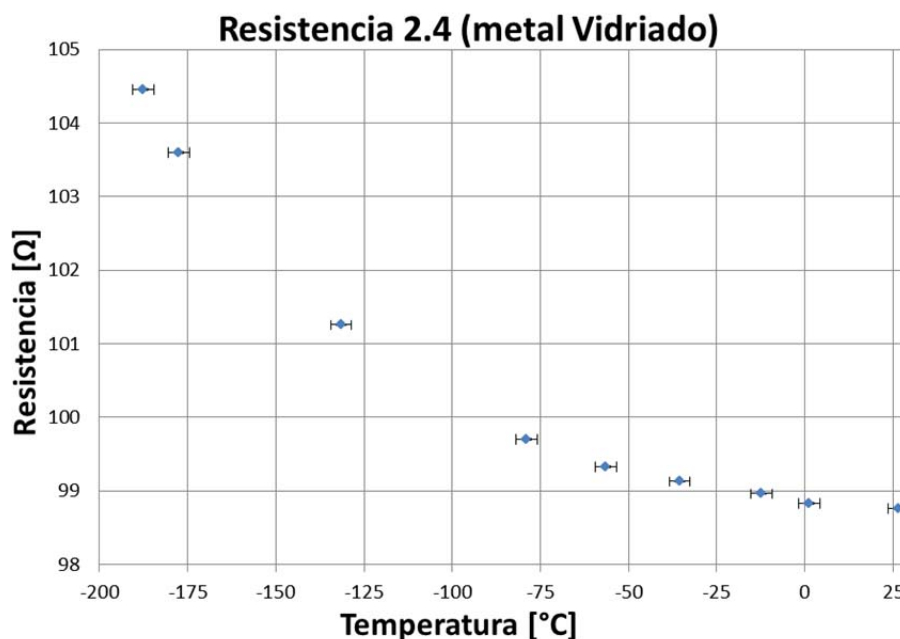
comportamiento de las resistencias de este tipo no son lineales, ya que al principio puede parecer que sí pero a partir de los  $-80^{\circ}\text{C}$  esa aparente linealidad se rompe.

Este tipo de resistencias no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo con ellas. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$  a  $-196^{\circ}\text{C}$ .

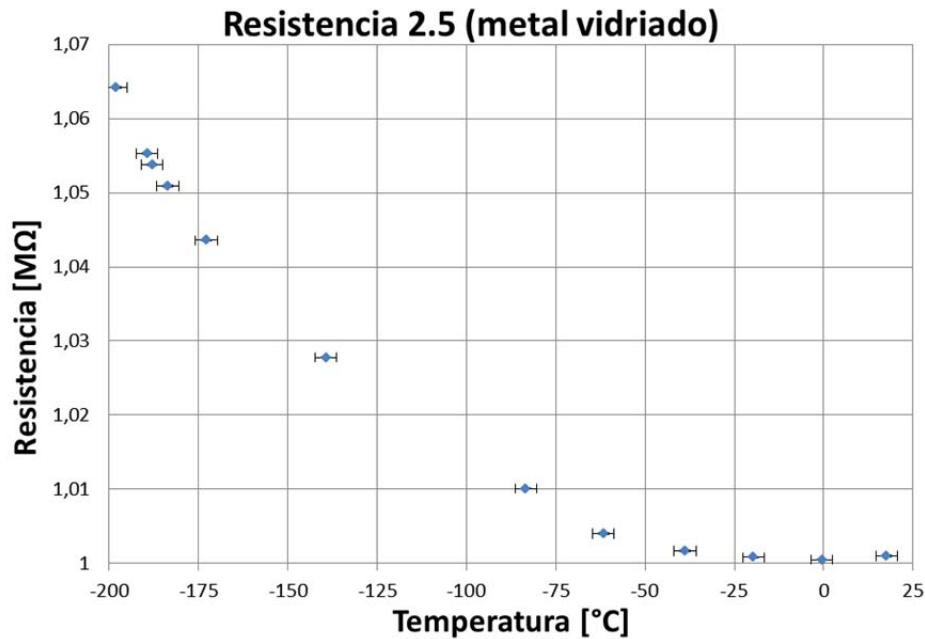
De este tipo de resistencias también podemos sacar otra conclusión o posible estudio, como es que gracias a la variación que sufren podrían actuar como resistencias variables si se consiguiera conocer detalladamente su variación con respecto a la temperatura.

### **Resistencias de Metal Vidriado**

Se han estudiado muchas resistencias de este tipo de diferentes valores para este ensayo y en todas se cumple más o menos el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se van a utilizar las gráficas de dos resistencias que ofrecerán los resultados obtenidos en el ensayo con ellas y que se representan en las figuras 46 y 47.



*Fig. 46 Temperatura vs. Resistencia de Metal Vidriado 2.4.*



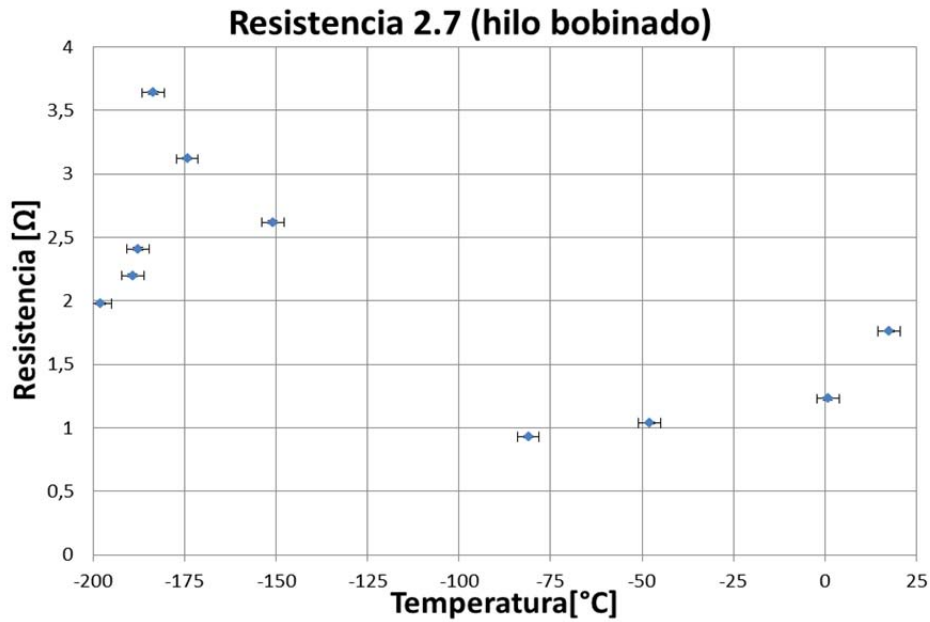
*Fig. 47 Temperatura vs. Resistencia de Metal Vidriado 2.5.*

Como se puede ver en las figuras anteriores, la relación entre resistencia y temperatura es inversamente proporcional en el caso de las resistencias de metal vidriado. La variación es aproximadamente del 6% en ambos componentes, siendo un margen no muy grande de variación. También se puede observar, que el comportamiento de este tipo de resistencias no es lineal, de hecho, en la gráfica se ve que dibuja más o menos una curva es más o menos lineal en el rango de temperaturas practicadas en el estudio.

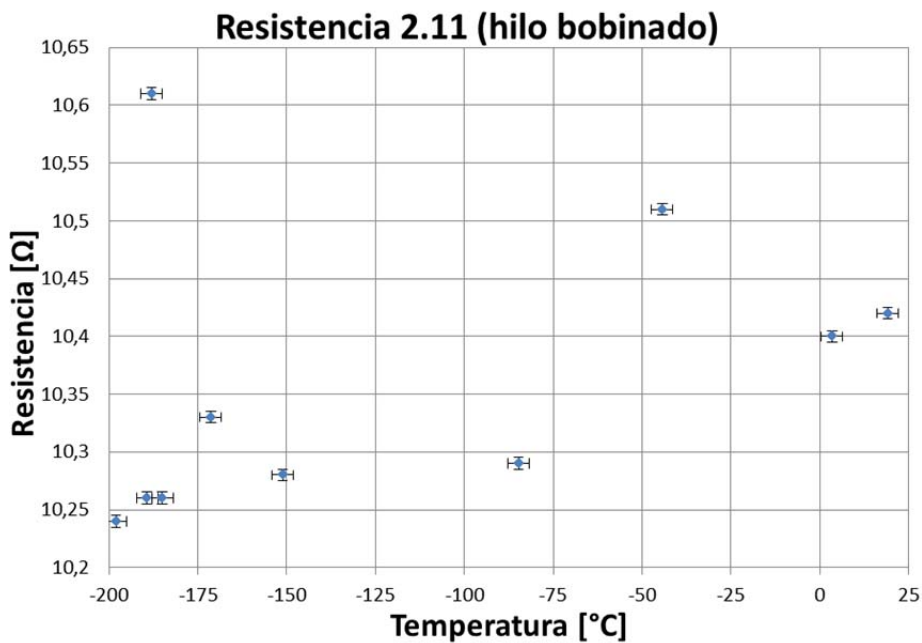
Este tipo de resistencias no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo con ellas. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

### **Resistencias de Hilo Bobinado**

Se han estudiado muchas resistencias de este tipo para diferentes valores correspondientes a este ensayo y en todas se cumple aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se van a utilizar las gráficas de dos resistencias que ofrecerán los resultados obtenidos en el ensayo con ellas y que se representan en las siguientes figuras.



*Fig. 48 Temperatura vs. Resistencia de Hilo Bobinado 2.7.*



*Fig. 49 Temperatura vs. Resistencia de Hilo Bobinado 2.11*

Como se puede ver en las figuras 48 y 49, en este tipo de resistencias el comportamiento no es para nada lineal y sufren cambios bruscos en los valores de resistencia. No son saltos muy grandes aunque sí que crean algún pico, aun así el valor termina siendo muy parecido a  $-196^{\circ}\text{C}$  que a temperatura ambiente. Un pico característico en estas resistencias es el que se produce sobre los  $-185^{\circ}\text{C}$ , ya que, sobre esta temperatura se produce la mayor variación, siendo siempre un valor más alto que el

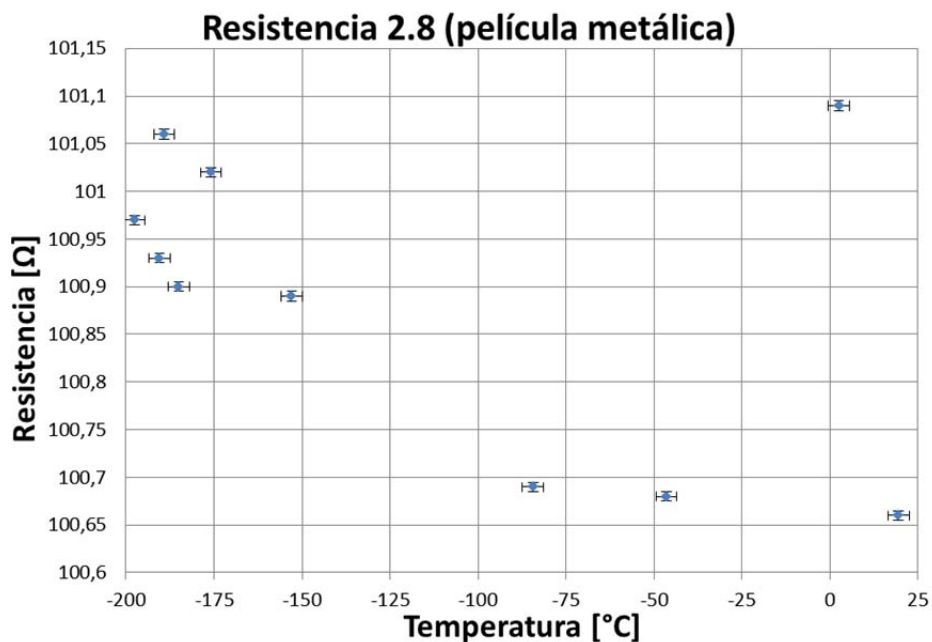


de temperatura ambiente. Aunque estas resistencias no describan un patrón preciso su variación es bastante pequeña y están dentro del margen de tolerancias marcado por el fabricante. Para obtener una conclusión definitiva, sería necesario analizar estadísticamente este tipo de resistencias.

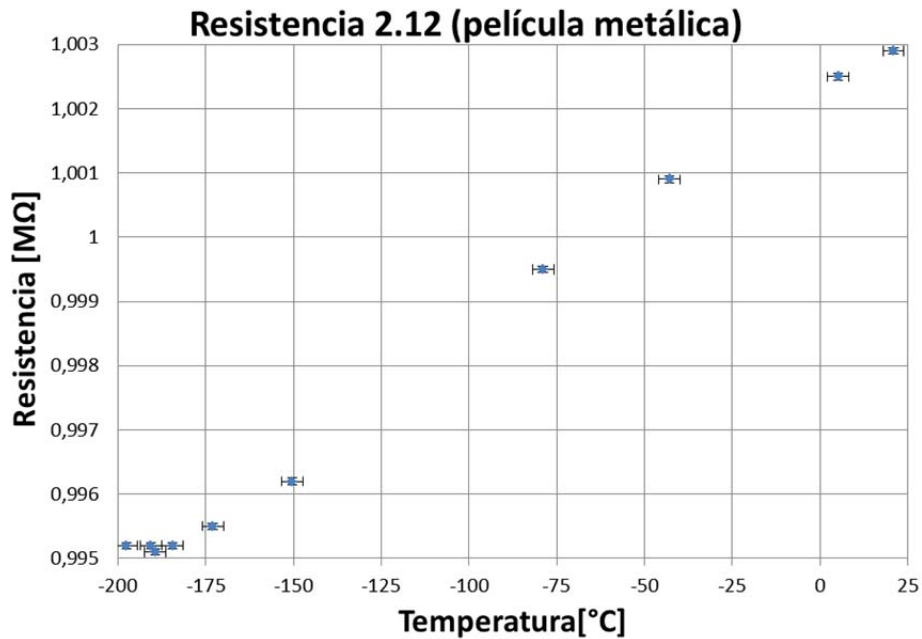
Este tipo de resistencias no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo con ellas. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

### **Resistencias de Película Metálica**

Se han estudiado muchas resistencias de este tipo de diferentes valores para este ensayo y en todas se cumple más o menos el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se van a utilizar las gráficas de tres resistencias de diferentes valores con diferentes magnitudes que ofrecerán los resultados obtenidos en el ensayo con ellas y que se representan en las figuras 50 y 51.



*Fig. 50 Temperatura vs. Resistencia de Película Metálica 2.8.*



*Fig. 51 Temperatura vs. Resistencia de Película Metálica 2.12.*

Como se puede ver en las figuras anteriores, la relación entre resistencia y temperatura puede ser inversamente proporcional o directamente proporcional para las resistencias de película metálica. Este hecho comprobamos que es debido a los materiales o componentes del que están hechas. Las fabricadas con Níquel-Cromo (2.8) tienen un comportamiento menos lineal y su resistencia es inversamente proporcional a la temperatura. Las fabricadas con Zinc-Cobre (2.12) se comportan más linealmente y su resistencia es directamente proporcional a la temperatura. La variación es aproximadamente del 1% en todas las resistencias de película metálica, dando igual que estén fabricadas de unos materiales o de otros, siendo un margen bastante pequeño de variación.

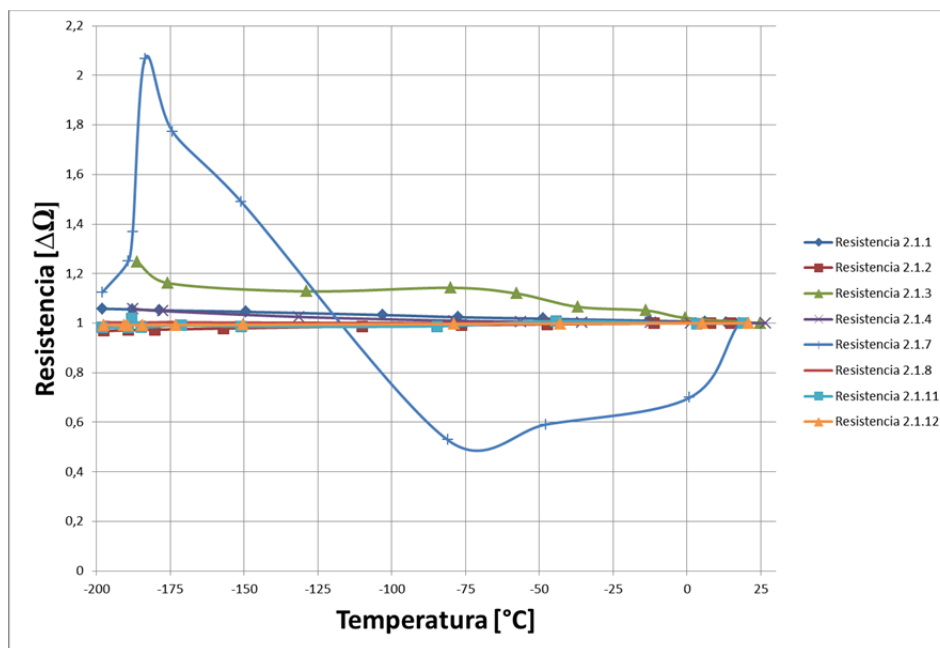
Este tipo de resistencias no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo con ellas. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

## **Resumen Resistencias**

En la Fig. 52, hemos incluido todos los tipos de resistencias que hemos utilizado como ejemplos para comparar el comportamiento que sufren las resistencias con

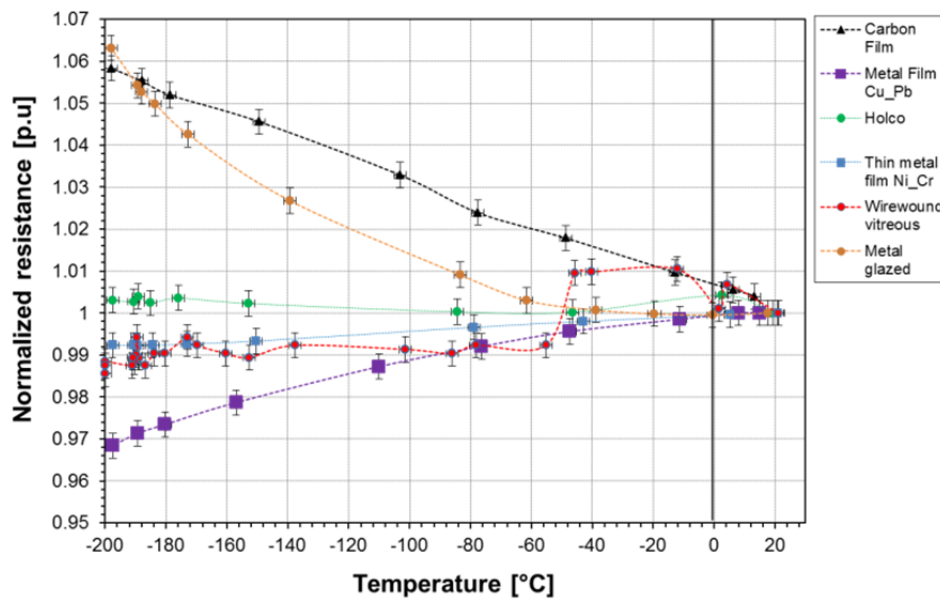
respecto a la temperatura. Con esto queremos ver de forma gráfica las diferentes variaciones que sufren dichos componentes. Lo que pretendemos con esta grafica es ver si todas las resistencias tienen aproximadamente el mismo comportamiento o sufren unas variaciones parecidas o si su comportamiento es lineal. También queremos determinar que resistencias tienen un mejor rendimiento y son recomendables para trabajar en el rango de temperaturas de los ensayos.

Para realizar la gráfica, y poder incluir de una manera razonable todas las resistencias siendo cada una de unos valores distintos, se ha elegido el valor inicial o a temperatura ambiente como la unidad y a partir de ese valor sacar la variación que va sufriendo la resistencia según va descendiendo la temperatura, con esto, conseguimos ver la variación que sufre cada una de las resistencias.



**Fig. 52** Temperatura vs. Variación de resistencia de las resistencias ensayadas.

Observando la figura anterior podemos sacar algunas conclusiones, como son que, en general, las resistencias tienen un comportamiento lineal según desciende la temperatura, que la variación en la mayoría de ellas es bastante pequeña y que su rendimiento en el rango de temperaturas de 30°C a -196°C es bastante bueno.



**Fig. 53 Temperatura vs. Resistencia Normalizada**

También se ha realizado una gráfica en la que se ve de una manera más detallada el comportamiento de las resistencias y apreciar mucho mejor si cuando las resistencias llegan a temperaturas criogénicas tienden a bajar o a subir su valor de resistencia.

Sacando algunas conclusiones, diremos que las resistencias que sufren una menor variación en el rango de temperaturas estudiado gracias a su mejor rendimiento, su mayor linealidad son las resistencias de película metálica fabricadas con Zinc-Cobre y las resistencias de película de Cu-Cobre. Las resistencias de composición cerámica son las que sufren la mayor variación y las de hilo bobinado, según los ensayos realizados, no podemos sacar una conclusión determinante sobre su comportamiento, por lo que pensamos que habría que hacer un estudio más detallado sobre resistencias de este tipo.

Por último, en la Fig. 54, se puede observar la variación que sufren los diferentes tipos de resistencias estudiadas después de haberlas sometido a un ciclo térmico de temperaturas (de Tª ambiente a -196°C). El ciclo térmico que nosotros hemos realizado trata de medir los componentes a temperatura ambiente, para después someterlos a la temperatura del LN2. Después, esperar hasta que el componente vuelva a estar a temperatura ambiente y comprobar si ha sufrido alguna variación. El gráfico demuestra que en general la variación para todas las resistencias es muy pequeña o nula y que el ciclo térmico no influye en su comportamiento ni en su rendimiento.

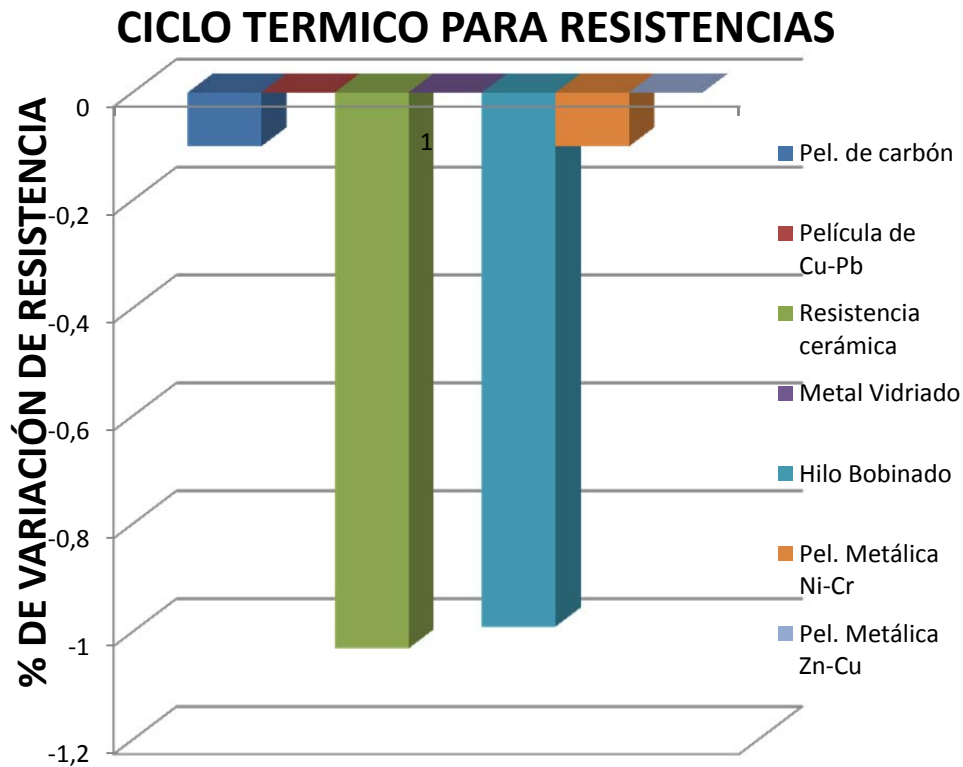


Fig. 54 Variación de las resistencias después de un ciclo térmico

### 3.5.2 TEMPERATURA VS. CONDENSADORES

En esta ocasión hablaremos de cómo cambia el valor de la capacidad de diferentes tipos de condensadores convencionales y de uso común según va bajando el valor de la temperatura, sabiendo que cambio se producen en los mismos y si es conveniente utilizarlos en temperaturas criogénicas. Los tipos de condensadores que hemos estudiado son: de papel siendo el material utilizado papel metalizado, electrolítico fabricado con aluminio, cerámico monocapa siendo el material utilizado cerámica, película de plástico fabricado de poliéster, solido de tántalo siendo el material utilizado el tantalio y de mica fabricado de mica. En la tabla 11, se detallan las características más importantes de los condensadores utilizados como ejemplo, el tipo y el código de proyecto y de fabricante que tienen cada uno de ellos.

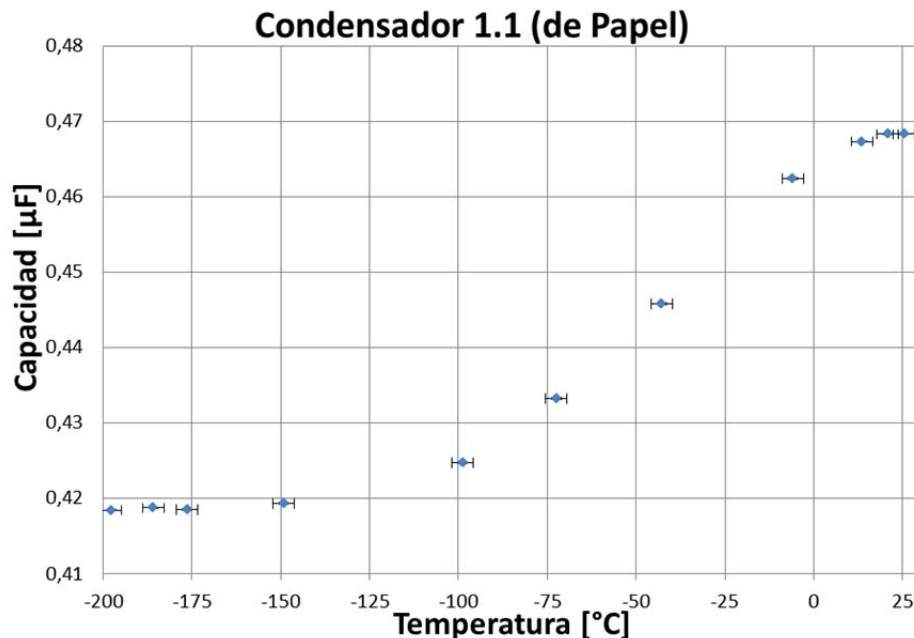
## Sistema experimental para la caracterización de componentes electrónicos pasivos a temperaturas criogénicas

Componente	Capacidad	Unidades	Tolerancia	Tensión	Temperatura Min. [°C]	Tipo	Material	Código fabricante	Código proyecto	Valor T <sup>a</sup> amb.	Valor T <sup>a</sup> LN2	Variación relativa
Condensador	47	nF	20%	300 Vac	-40	Papel	Papel	206-7718	1.1	46,39	41,27	11,04%
Condensador	100	μF	20%	16 Vdc	-40	Electrolítico	Aluminio	440-6569	1.2	100,29	1,98	98,03%
Condensador	1	nF	20%	250 Vac	-25	cerámico monocapa	Cerámica	721-5173P	1.3	1,0565	0,0578	94,53%
Condensador	10	nF	5%	100Vdc, 63 Vac	-55	Película de plástico	Poliéster	334-243	1.4	10,122	9,028	10,81%
Condensador	220	nF	20%	35 Vdc	-55	Sólido de Tántalo	Tántalo	684-4358	1.5	226,4	192,2	15,11%
Condensador	100	pF	5%	500 Vdc	-55	de Mica	Mica	744-1530	1.6	0,1268	0,1223	3,55%

*Tabla 11. Características más importantes de los condensadores del ensayo.*

### Condensadores de papel

Durante el ensayo hemos estudiado varios condensadores de este tipo con diferentes valores de capacidad y en todos ellos se cumple aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se va a utilizar la gráfica de uno de ellos que nos dará y representará los resultados obtenidos como se podrá ver en el figura 55.



*Fig. 55 Temperatura vs. Capacidad condensador de papel 1.1.*

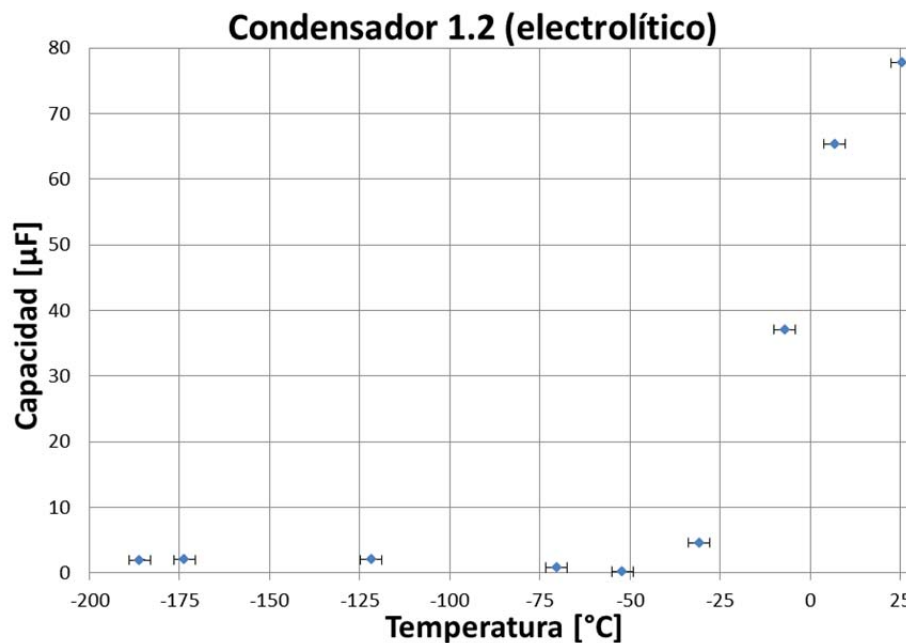
Como se puede observar en la gráfica, este tipo de condensadores tienen un comportamiento bastante lineal sobre todo al principio. Cuanto más se van acercando a

la temperatura del nitrógeno líquido el valor de la capacidad se estabiliza y permanece prácticamente constante. La relación de la capacidad con la temperatura es directamente proporcional para los condensadores de papel estudiados. En este tipo de condensadores, tenemos un margen de variación de la capacidad de un 5% más o menos el cual no es excesivamente grande pero si apreciable.

Este tipo de condensadores no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo de temperaturas con ellos. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

### **Condensador electrolítico**

A través de los ensayos que hemos realizado a varios condensadores de este tipo con diferentes valores de capacidad y cumpliéndose en todos ellos aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se va a utilizar la gráfica de uno de ellos que nos dará y representará los resultados obtenidos como se podrá ver en el figura 56.



*Fig. 56 Temperatura vs. Capacidad condensador electrolítico 1.2.*

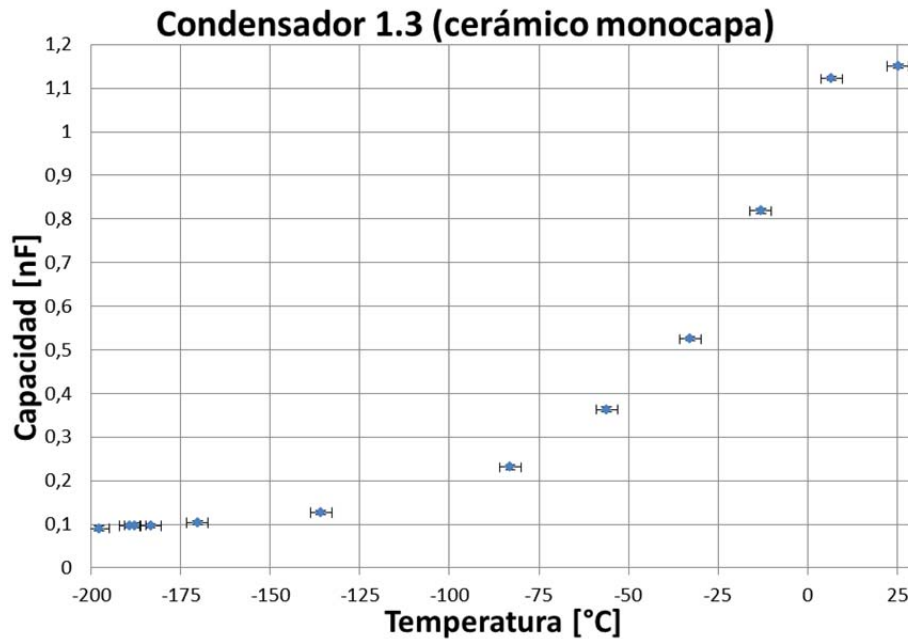
Como se puede observar en la figura anterior, este tipo de condensadores tienen un comportamiento lineal con una pendiente muy pronunciada al principio que a partir de la temperatura de  $-50^{\circ}\text{C}$  aproximadamente deja de descender y pasa a ser constante incluido cuando llega a la temperatura del nitrógeno líquido. También se observa que la relación entre la capacidad y la temperatura es directamente proporcional, llegando a su máxima variación cuando alcanza la temperatura de  $-50^{\circ}\text{C}$  donde se hace prácticamente cero. En este tipo de condensadores, tenemos un margen de variación de la capacidad de un 99% más o menos el cual es completamente inaceptable. Esta variación se produce porque el dieléctrico del condensador deja funcionar correctamente, ya que, se congela a partir de  $-50^{\circ}\text{C}$ , dando igual seguir bajando la temperatura porque no cambia, y su valor a partir de ahí seguirá siendo aproximadamente cero.

Este tipo de condensadores si sufren variación en sus valores de capacidad después de haber realizado un ciclo térmico completo de temperaturas con ellos. Por tanto, no podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$  a  $-196^{\circ}\text{C}$ .

### **Condensador cerámico monocapa**

Durante el ensayo hemos estudiado varios condensadores de este tipo con diferentes valores de capacidad y en todos ellos se cumple aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se va a utilizar la gráfica de uno de ellos que nos dará y representará los resultados obtenidos como se podrá ver en el figura 57.





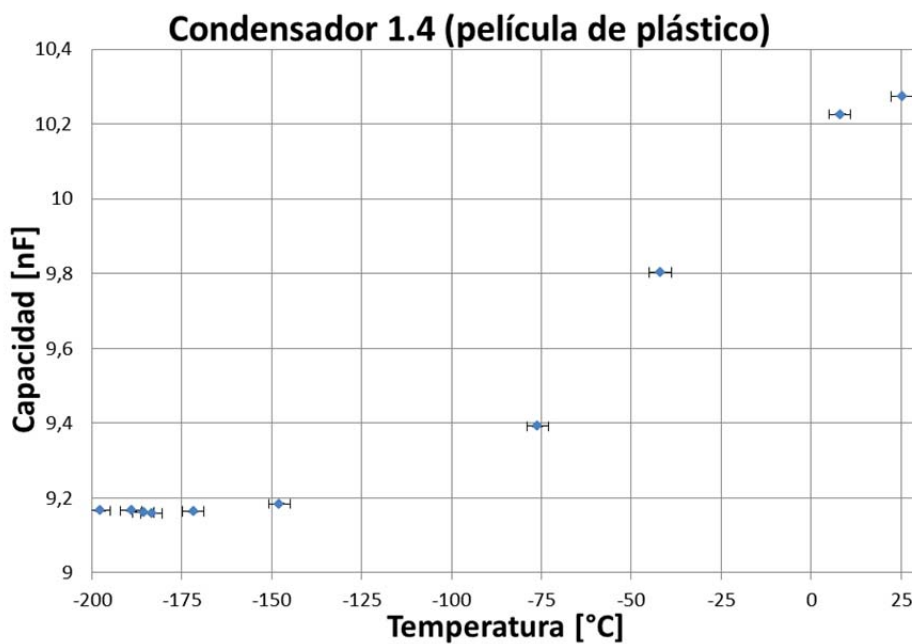
*Fig. 57 Temperatura vs. Capacidad condensador cerámico monocapa 1.3.*

Como se puede observar en la gráfica, este tipo de condensadores tienen un comportamiento poco lineal, más bien tiene tendencia a dibujar una curva, sobre todo al principio y cuanto más se van acercando a la temperatura del nitrógeno líquido el valor de la capacidad se estabiliza y permanece prácticamente constante. También se observa que la relación entre la capacidad y la temperatura es directamente proporcional. En este tipo de condensadores, tenemos un margen de variación de la capacidad de un 93% aproximadamente el cual es inaceptable, ya que, el valor de la capacidad según pasa de valores positivos a valores negativos de temperatura da un bajón bastante grande, y por tanto, deja enseguida de ser un condensador con la capacidad adecuada. Aproximadamente a  $-80^{\circ}\text{C}$  su capacidad desciende más de un 75%, llegando a ser su capacidad prácticamente cero cuando lo medimos a la temperatura del nitrógeno líquido.

Este tipo de condensadores no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo de temperaturas con ellos. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$  a  $-196^{\circ}\text{C}$ .

## Condensador de película de plástico

A través de los ensayos que hemos realizado a varios condensadores de este tipo con diferentes valores de capacidad y cumpliéndose en todos ellos aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se va a utilizar la gráfica de uno de ellos que nos dará y representará los resultados obtenidos como se podrá ver en el figura 58.



*Fig. 58 Temperatura vs. Capacidad condensador película de plástico 1.4.*

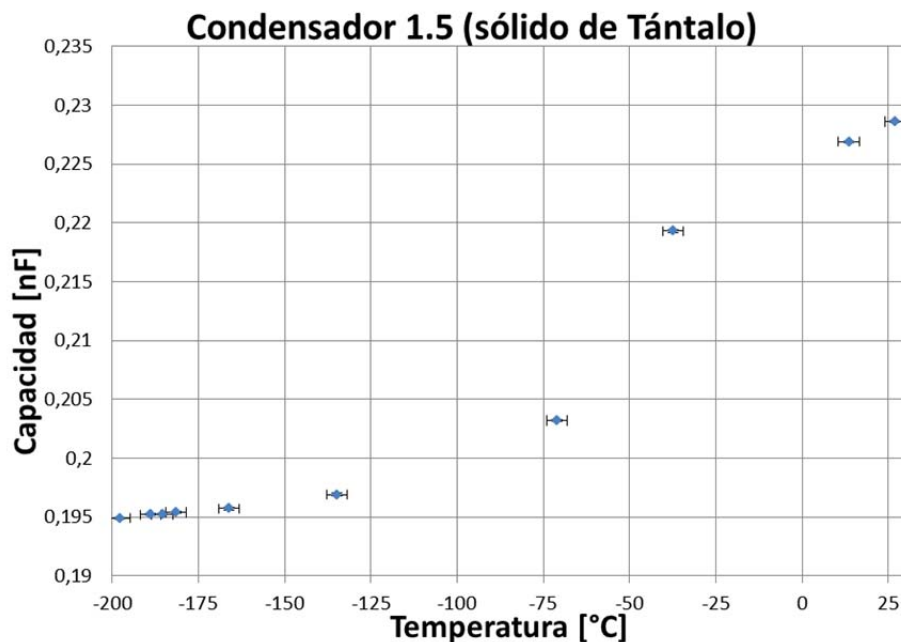
Como se puede observar en la figura anterior, este tipo de condensadores tienen un comportamiento bastante lineal sobre todo al principio. Cuanto más se van acercando a la temperatura del nitrógeno líquido el valor de la capacidad se estabiliza y permanece prácticamente constante, estabilizándose sobre todo a partir de los  $-150^{\circ}\text{C}$ . También se observa que la relación de la capacidad con la temperatura es directamente proporcional. En este tipo de condensadores, tenemos un margen de variación de la capacidad de un 10%, el cual no es excesivamente grande.

Este tipo de condensadores no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo de temperaturas con ellos. Por tanto, podemos

decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

### **Condensador solido de Tántalo**

Durante el ensayo hemos estudiado varios condensadores de este tipo con diferentes valores de capacidad y en todos ellos se cumple aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se va a utilizar la gráfica de uno de ellos que nos dará y representará los resultados obtenidos como se podrá ver en el figura 59.



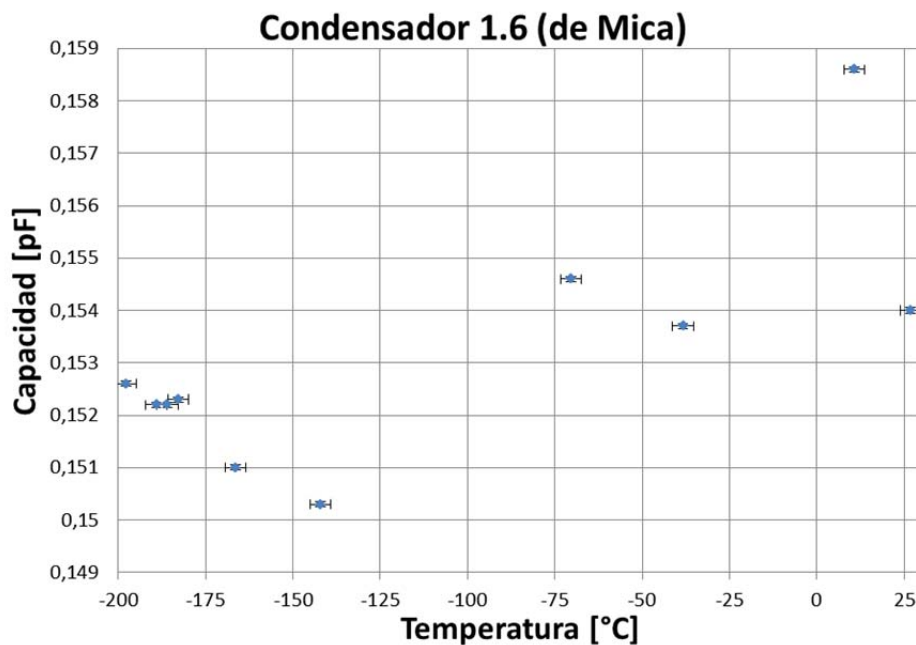
*Fig. 59 Temperatura vs. Capacidad condensador solido de Tántalo 1.5.*

Como se puede observar en la gráfica, este tipo de condensadores parece tienen un comportamiento lineal en la primera parte de la gráfica. Cuando se van acercando a la temperatura del nitrógeno líquido en este caso sobre las -160°C el valor de la capacidad se estabiliza y permanece prácticamente constante. También se ve que la relación entre la capacidad y la temperatura es directamente proporcional. En este tipo de condensadores, tenemos un margen de variación de la capacidad de un 3,5% aproximadamente el cual consideramos que es pequeño.

Este tipo de condensadores no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo de temperaturas con ellos. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

### **Condensadores de Mica**

A través de los ensayos que hemos realizado a varios condensadores de este tipo con diferentes valores de capacidad y cumpliéndose en todos ellos aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se va a utilizar la gráfica de uno de ellos que nos dará y representará los resultados obtenidos como se podrá ver en el figura 60.



*Fig. 60 Temperatura vs. Capacidad condensador de mica 1.6.*

Como se puede observar en la figura anterior, este tipo de condensadores tienen un comportamiento poco lineal, ya que, sufren un par de picos en su valor de la capacidad, sobre los 12°C subiendo su valor de la capacidad y sobre los -140°C bajándolo, siendo este su valor de capacidad más bajo. Para luego, ir subiendo la capacidad hasta más o menos ser cercana al valor a temperatura ambiente. En este caso

no podemos decir que la relación entre capacidad y temperatura siga una tendencia determinada, siendo bastante variable. En este tipo de condensadores, tenemos un margen de variación de la capacidad de un 1% más o menos, el cual es muy pequeño.

Este tipo de condensadores no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo de temperaturas con ellos. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

### **Resumen Condensadores**

En la Fig. 61 hemos incluido todos los condensadores que hemos utilizado como ejemplos para comparar el comportamiento que sufre la capacidad con respecto a la temperatura, para ver de forma gráfica las diferentes variaciones que sufren dichos componentes. Lo que pretendemos con esta grafica es ver si todos los condensadores tienen aproximadamente el mismo comportamiento o sufren unas variaciones parecidas o si su comportamiento es lineal. También queremos determinar que condensadores tienen un mejor rendimiento y son recomendables para trabajar en el rango de temperaturas de los ensayos.

Para realizar la gráfica, y poder incluir de una manera razonable todos los condensadores siendo cada uno de ellos de valores distintos de capacidad, se ha elegido el valor inicial o a temperatura ambiente como la unidad y a partir de ese valor, sacar la variación que va sufriendo el condensador según va descendiendo la temperatura, con esto, conseguimos ver en la misma figura la variación que sufre cada uno de los condensadores.

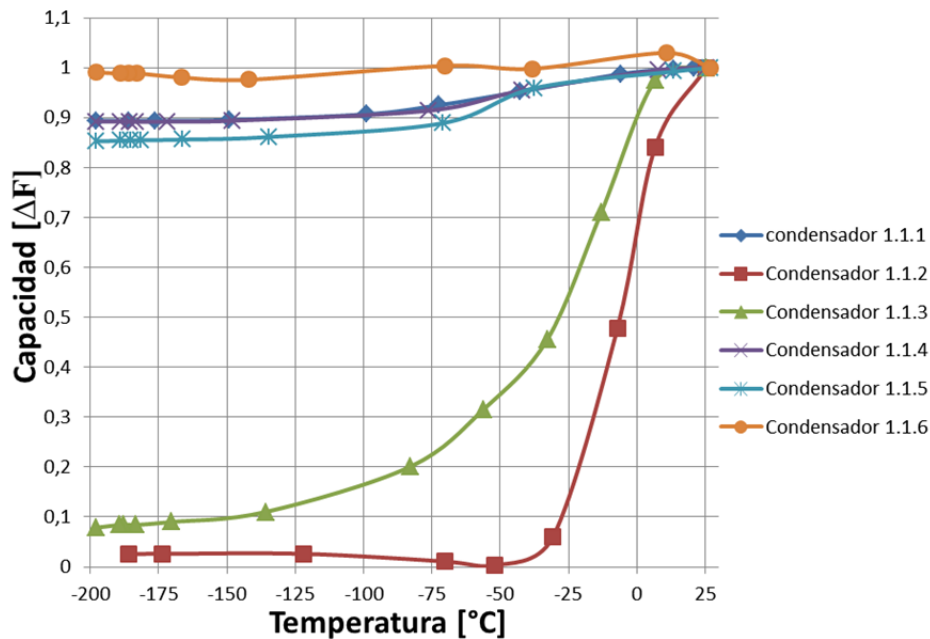
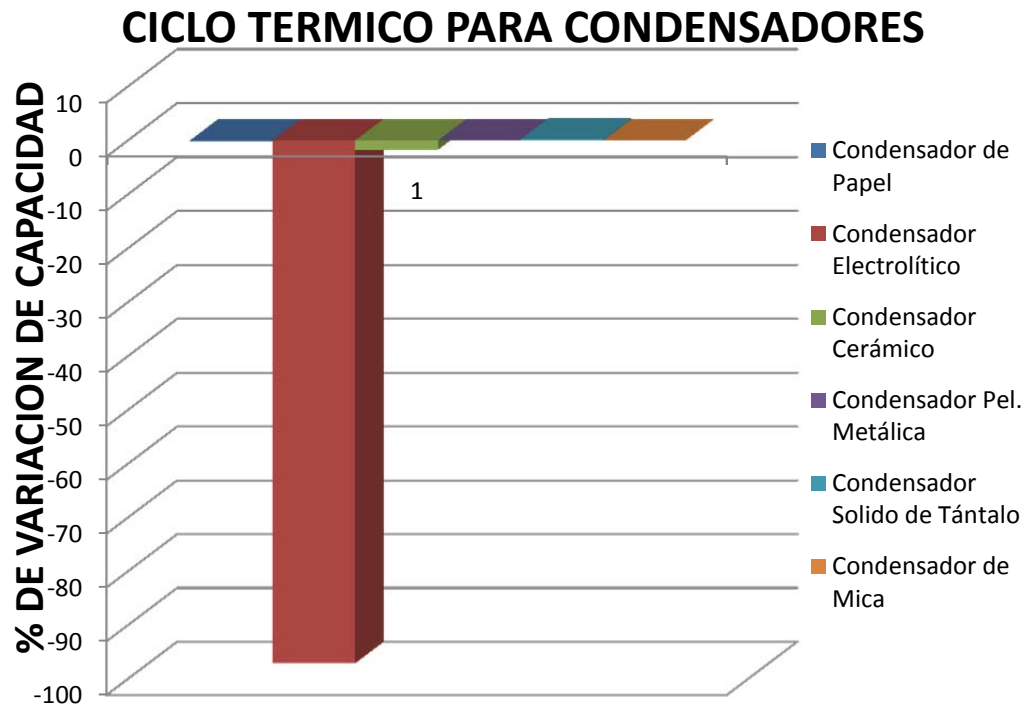


Fig. 61 Temperatura vs. Variación de capacidad

Observando la figura anterior podemos sacar algunas conclusiones, como son que, en general, la mayoría de los condensadores tiene un comportamiento lineal según descende la temperatura, que la variación de la capacidad en casi todos ellos es bastante pequeña y que su rendimiento en el rango de temperaturas de 30°C a -196°C es en general bueno. Para concretar algo más, diremos que los condensadores con menor variación de la capacidad son los de mica y los sólidos de Tántalo. Los condensadores que mejor linealidad presentan son los de papel, siendo los condensadores de película de plástico, en concreto los de poliéster, los que tienen la linealidad menos pronunciada. Los condensadores electrolíticos de aluminio y los cerámicos monocapa presentan una variación en su capacidad muy elevada que en ambas cosas se acerca al cero cuando trabajan a temperaturas criogénicas.



*Fig. 62 Variación de los condensadores después de un ciclo térmico*

Por último, en la Fig. 62, se puede observar la variación que sufren los diferentes tipos de condensadores estudiados después de haberlas sometido a un ciclo térmico de temperaturas (de  $T^a$  ambiente a  $-196^{\circ}\text{C}$ ). El ciclo térmico que nosotros hemos realizado trata de medir los componentes a temperatura ambiente, para después someterlos a la temperatura del LN2. Después, esperar hasta que el componente vuelva a estar a temperatura ambiente y comprobar si ha sufrido alguna variación. El gráfico demuestra que los condensadores electrolíticos sufren una variación de casi el 100% y que no se pueden utilizar a temperaturas criogénicas, ya que no recuperan su capacidad inicial.

En la figura 63, se ve la variación de los demás condensadores una vez quitado el electrolítico para que se pueda apreciar mejor. Los condensadores cerámicos sufren casi una variación del 2% de su capacidad inicial antes del ciclo térmico, mientras que en los demás es despreciable o nula. El condensador solido de Tántalo tiene una peculiaridad que es que el valor de la capacidad sube después de haber realizado el ciclo térmico, aunque como sube muy poco es despreciable.

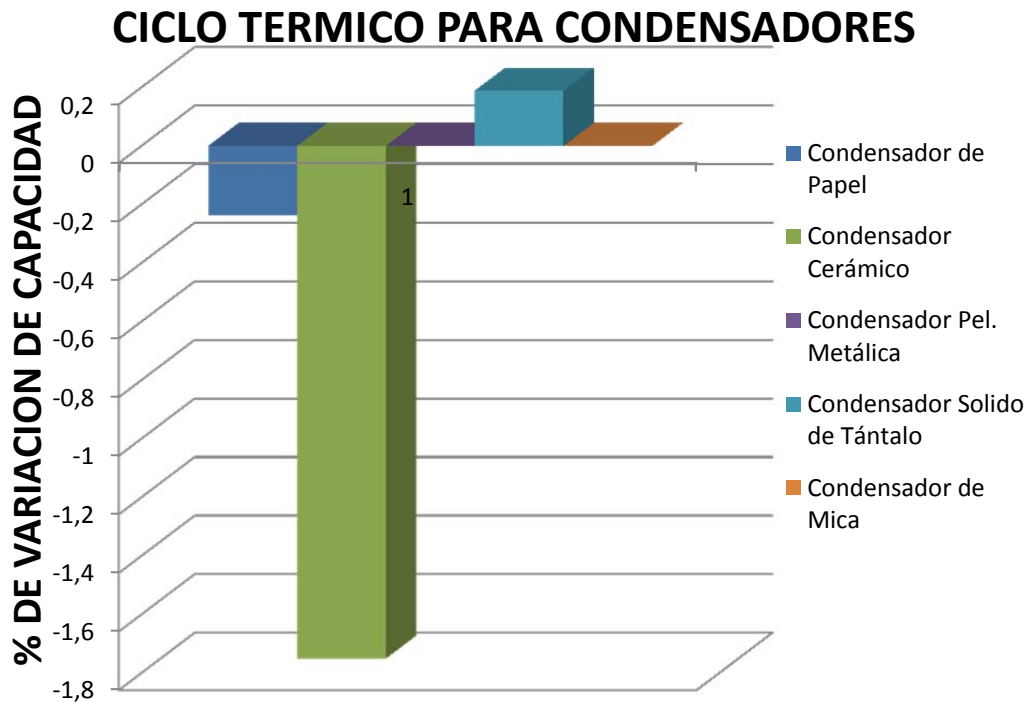


Fig. 63 Variación de los condensadores sin el condensador electrolítico

### 3.5.3 TEMPERATURA VS. DIODOS

En este apartado, hablaremos de cómo cambia el valor del voltaje o tensión umbral de diferentes tipos de diodos y diodos zener convencionales y de uso común según va bajando el valor de la temperatura, sabiendo que cambios se producen en los mismos y si es conveniente utilizarlos en temperaturas criogénicas. Los tipos de diodos son diodos de conmutación y diodos zener, para los diodos de conmutación hemos seleccionado tres de tres fabricantes distintos que se pueden conseguir en cualquier tienda de electrónica, y para los diodos zener hemos elegido tres de la misma marca pero de diferentes voltajes para saber si dependiendo de dicho voltaje sufren cambios en sus comportamientos. En la tabla 12, se detallan las características más importantes de los diodos y diodos zener utilizados como ejemplo se detalla cada tipo, el código de proyecto y de fabricante que tienen cada uno de ellos.



## Sistema experimental para la caracterización de componentes electrónicos pasivos a temperaturas criogénicas

Componente	Fabricante	Tensión	unidades	Tensión Inversa Max.	Corriente Max. Directa	Temperatura Min. [°C]	Tipo	Código fabricante	Código proyecto	Material	Utilización principal	Valor T <sup>a</sup> amb.	Valor T <sup>a</sup> LN2	Variación relativa
Diodo BAS45A(13)	NXP	1	V	125 V	0,25 A	-65	Diodo de conmutación	508-270	3.1.1	Silicio	señal de conmutación	596,2	1030,5	42,14%
Diodo BAV(20)	Vishay	1	V	200 V	0,25 A	-65	Diodo de conmutación	708-7760	3.1.2	Silicio	Diodo de señal	572,6	1033,7	44,61%
Diodo DO41(119)	DiodesZetex	1	V	50V	1,0 A	-65	Diodo de conmutación	751-2718	3.1.3	Antimoniuro de Indio	Diodo de potencia para conmutación	691,6	1053,6	34,36%
Componente	Tensión zener	unidades	Tolerancia	Corriente de fugas	Corriente de pruebas	Impedancia Maxima	Disipación de Potencia Max.	Código fabricante	Código proyecto	Material	Utilización principal	Valor T <sup>a</sup> amb.	Valor T <sup>a</sup> LN2	Variación relativa
Diodo Zener BZX85	8,2	V	5%	1 $\mu$ A	25 mA	200 $\Omega$	1,3 W	812-443	3.2.1	Silicio	Diodo zener aplicaciones industriales	717,5	1053,8	31,91%
Diodo Zener BZX85	6,8	V	5%	1 $\mu$ A	35 mA	300 $\Omega$	1,3 W	812-421	3.2.2	Silicio	Diodo zener aplicaciones industriales	723,5	1054,3	31,38%
Diodo Zener BZX85	4,7	V	5%	3 $\mu$ A	45 mA	500 $\Omega$	1,3 W	812-386	3.2.3	Silicio	Diodo zener aplicaciones industriales	713,7	1033,6	30,95%

*Tabla 12. Características más importantes de los diodos del ensayo.*

### Diodos

Se han estudiado algunos diodos de diferentes fabricantes y de distintos valores de tensión inversa máxima y corriente máxima directa aunque con una tensión umbral aproximadamente igual, y en todos ellos se cumple aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se van a utilizar las gráficas de tres diodos de diferentes fabricantes que ofrecerán los resultados obtenidos en el ensayo con ellos y que se representan en las figuras 64, 65 y 66.

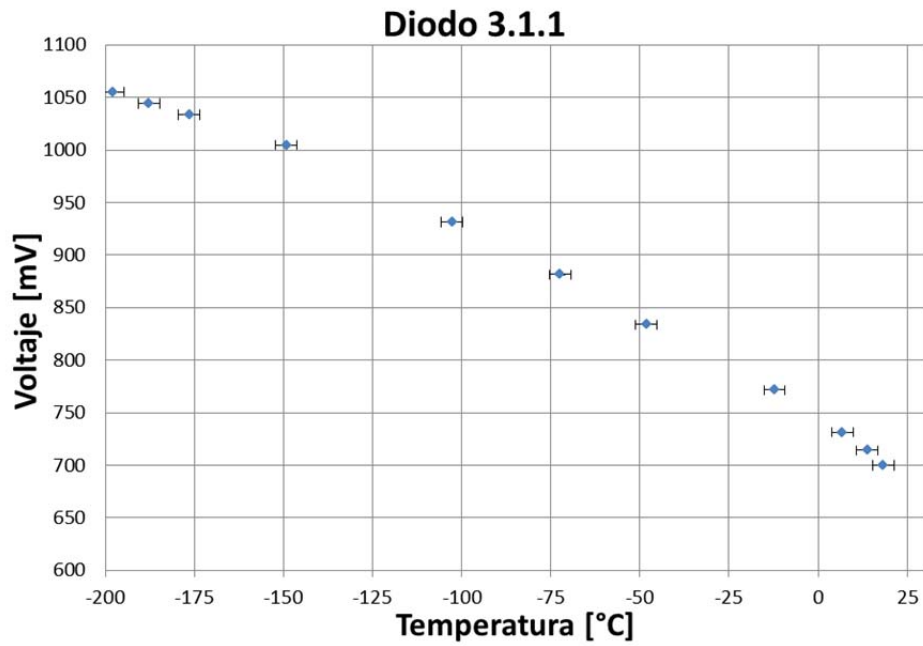


Fig. 64 Temperatura vs. Tensión umbral diodo fabricante NPX 3.1.1.

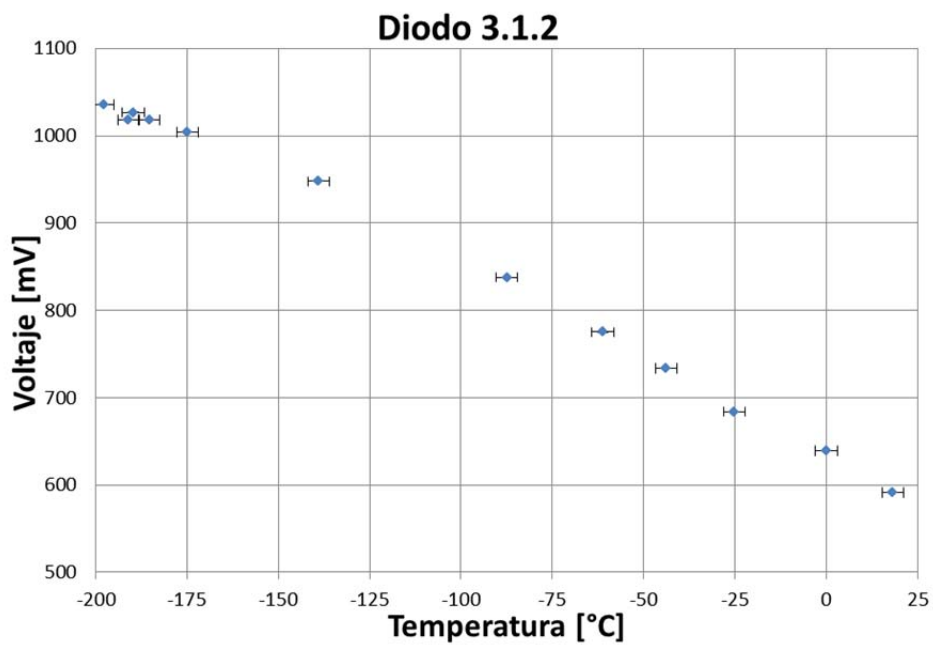


Fig. 65 Temperatura vs. Tensión umbral diodo fabricante Vishay 3.1.2.

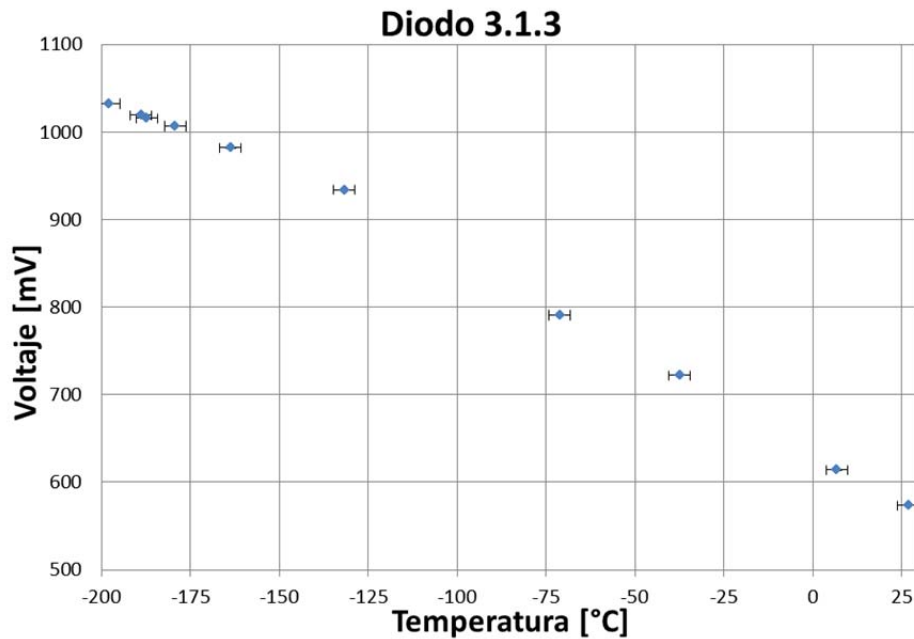


Fig. 66 Temperatura vs. Tensión umbral diodo fabricante DiodesZetex 3.1.3.

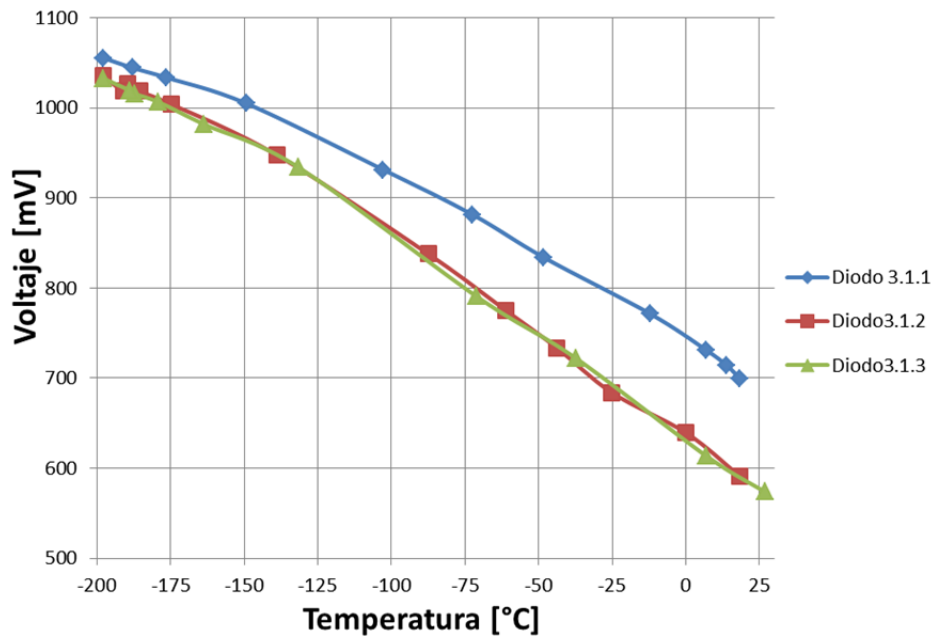
Las gráficas de los diodos muestran un comportamiento muy lineal en todos los casos. También se observa que la relación entre el voltaje y la temperatura es inversamente proporcional, llegando a su máxima variación cuando alcanza la temperatura del nitrógeno líquido. En este tipo de diodos, tenemos un margen de variación de la tensión umbral entre un 35% y un 45% más o menos el cual es un margen bastante grande. Otra de las conclusiones que podemos sacar es que tienen un comportamiento muy predecible y constante, y gracias a eso, se podría investigar más en profundidad este hecho y poder sacar beneficio de ello en otras aplicaciones.

Este tipo de diodos no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo de temperaturas con ellos. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

## Resumen Diodos

En la Fig. 67 hemos incluido todos los diodos que hemos utilizado como ejemplos para comparar el comportamiento que sufre el voltaje con respecto a la

temperatura, para ver de forma gráfica las diferentes variaciones que sufren dichos componentes. Lo que pretendemos con esta grafica es ver si todos los diodos tienen aproximadamente el mismo comportamiento, si sufren unas variaciones parecidas o si su comportamiento es lineal. También queremos determinar que diodos tienen un mejor rendimiento y son recomendables para trabajar en el rango de temperaturas de los ensayos.



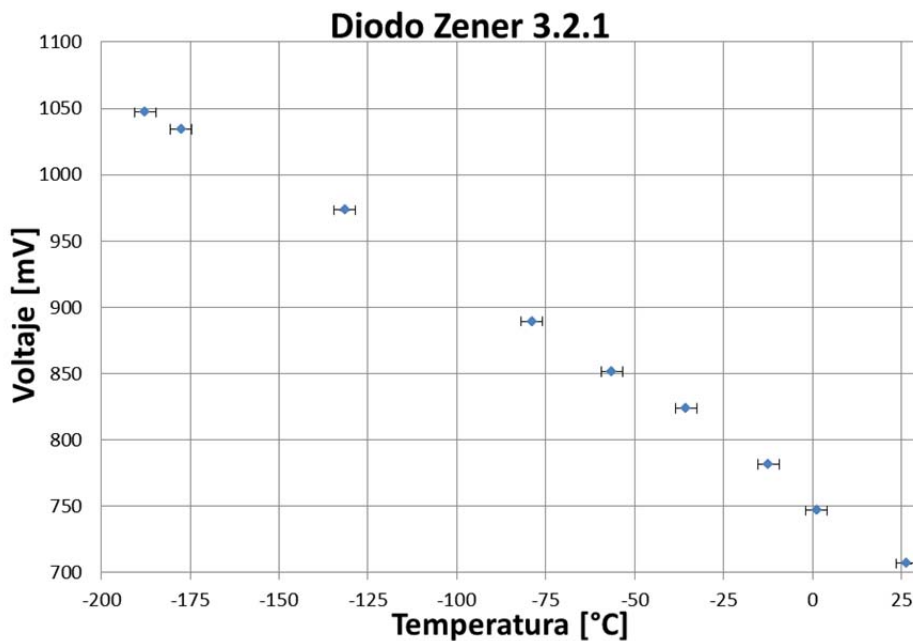
*Fig. 67 Temperatura vs. Voltaje de todos los diodos*

Observando la figura anterior podemos sacar algunas conclusiones, como son que, en general, todos los diodos tienen un comportamiento lineal según desciende la temperatura, que la variación del voltaje en todos ellos es bastante importante y que su rendimiento en el rango de temperaturas de 30°C a -196°C es bastante bueno. Para concretar algo más, diremos que todos los diodos tienen en mayor o menor medida el mismo rendimiento, linealidad y variación de voltaje umbral. Por otro lado, también podemos decir que da prácticamente igual el fabricante de los diodos que elijamos, ya que, su comportamiento es parecido para todos ellos y que la elección de un fabricante u otro podría depender de otros factores, como pueden ser, la fiabilidad, el precio o la facilidad para suministrar sus componentes, que son aspectos que no se han estudiado en este ensayo. También pensamos que los diodos pueden utilizarse a temperaturas

criogénicas porque son muy constantes y fiables pero que habría que realizar un estudio más exhaustivo de ellos para poderlos utilizar en cualquier tipo de aplicación.

## **Diodos zener**

Durante el ensayo hemos estudiado algunos diodos zener para diferentes tensiones zener y distintas impedancias máximas y corrientes de pruebas, y en todos se cumplen aproximadamente el mismo comportamiento. A modo de ejemplo de dicho comportamiento, se van a utilizar las gráficas de tres diodos zener con diferentes tensiones zener que ofrecerán los resultados obtenidos en el ensayo con ellos y que se representan en las figuras 68, 69 y 70.



*Fig. 68 Temperatura vs. Tensión umbral diodo zener 3.2.1.*

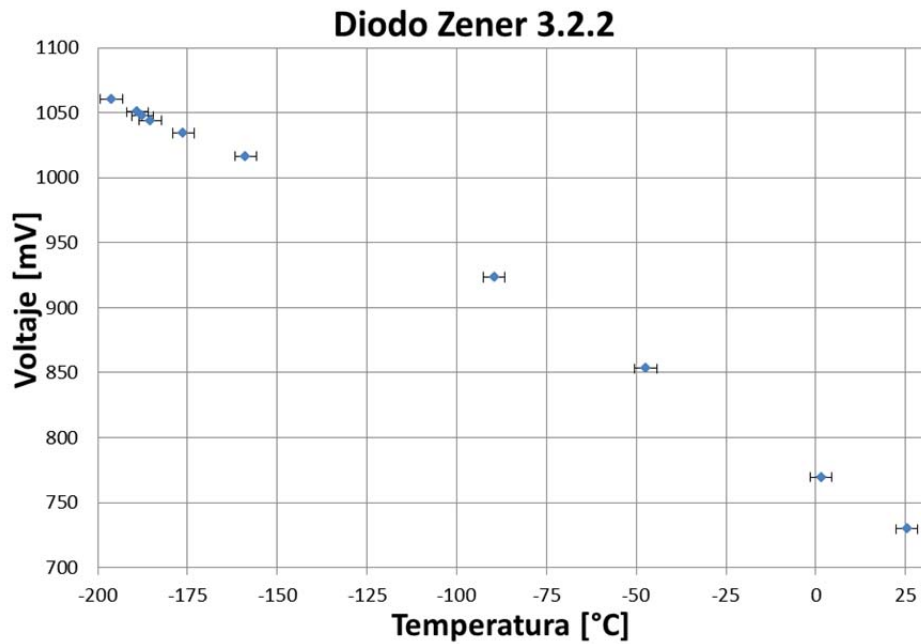


Fig. 69 Temperatura vs. Tensión umbral diodo zener 3.2.2.

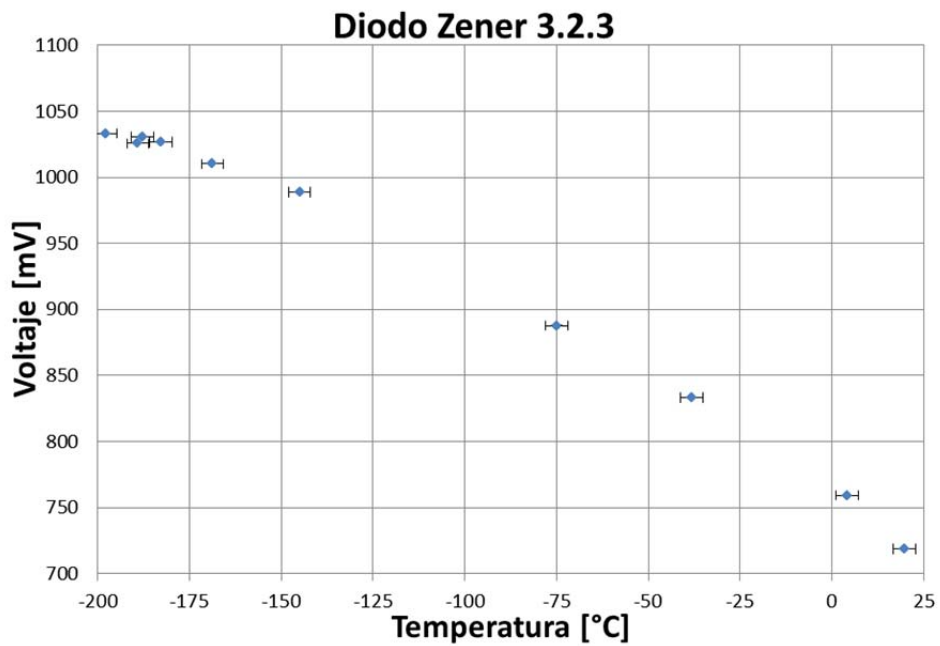


Fig. 70 Temperatura vs. Tensión umbral diodo zener 3.2.3.

Como se puede observar en las figuras anteriores, los tres diodos zener que hemos tomado como ejemplo, tienen un comportamiento muy lineal, sin sufrir grandes saltos en los valores del voltaje, los cuales se van reduciendo a medida que nos vamos acercando a la temperatura del nitrógeno líquido. También se puede ver que la relación

entre el voltaje y la temperatura es inversamente proporcional, llegando a su máxima variación cuando alcanza la temperatura del nitrógeno líquido. En este tipo de diodos, tenemos un margen de variación de la tensión umbral entre un 30% y un 32% más o menos el cual es un margen grande aunque. Por otro lado, también podemos decir que da prácticamente igual la tensión zener que elijamos en los diodos que, ya que, su comportamiento es más o menos idéntico para todas las tensiones zener y que la elección de dichos diodos corresponde simplemente a la tensión zener que necesitemos, por tanto, y dados los resultados de nuestros ensayos, no varía su comportamiento ni su rendimiento si modificamos ese parámetro.

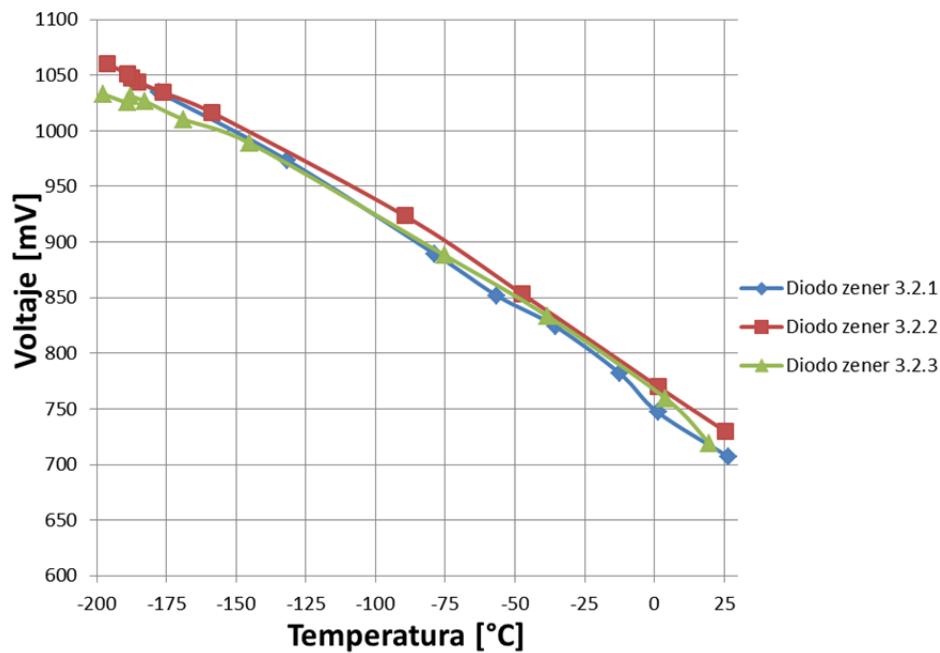
Este tipo de diodos zener no sufren ninguna variación en sus valores cuando realizamos un ciclo térmico completo de temperaturas con ellos. Por tanto, podemos decir que siempre tienen el mismo comportamiento en el margen de temperatura de 30°C a -196°C.

### **Resumen Diodos Zener**

En la Fig. 71 hemos incluido todos los diodos zener que hemos utilizado como ejemplos para comparar el comportamiento que sufre el voltaje con respecto a la temperatura, para ver de forma gráfica las diferentes variaciones que sufren dichos componentes. Lo que pretendemos con estas graficas es ver si todos los diodos zener tienen aproximadamente el mismo comportamiento, si sufren unas variaciones parecidas o si su comportamiento es lineal. También queremos determinar que diodos zener tienen un mejor rendimiento y son recomendables para trabajar en el rango de temperaturas de los ensayos.

Observando la figura podemos sacar algunas conclusiones, como son que, en general, todos los diodos zener tienen un comportamiento lineal según desciende la temperatura, que la variación del voltaje en todos ellos es bastante importante y que su rendimiento en el rango de temperaturas de 30°C a -196°C es bastante bueno. Para concretar algo más, diremos que todos los diodos tienen en mayor o menor medida el mismo rendimiento, linealidad y variación de voltaje umbral. Por otro lado, podemos decir que la tensión zener de los diodos no influye en su comportamiento a temperaturas

criogénicas, ya que, como se ha comprobado en este ensayo todos tienen un comportamiento muy similar. También pensamos que los diodos pueden utilizarse a temperaturas criogénicas porque son muy constantes y fiables pero que habría que realizar un estudio más exhaustivo de ellos para poderlos utilizar en cualquier tipo de aplicación.



*Fig. 71 Temperatura vs. Voltaje de todos los diodos zener*

Para realizar la gráfica de la fig. 72, y poder incluir de una manera razonable todos los diodos de conmutación y zener siendo cada uno de ellos de valores distintos de voltaje umbral, se ha elegido el valor inicial o a temperatura ambiente como la unidad y a partir de ese valor, sacar la variación que va sufriendo el diodo zener según va descendiendo la temperatura, con esto, conseguimos ver en la misma figura la variación que sufre cada uno de los diodos.



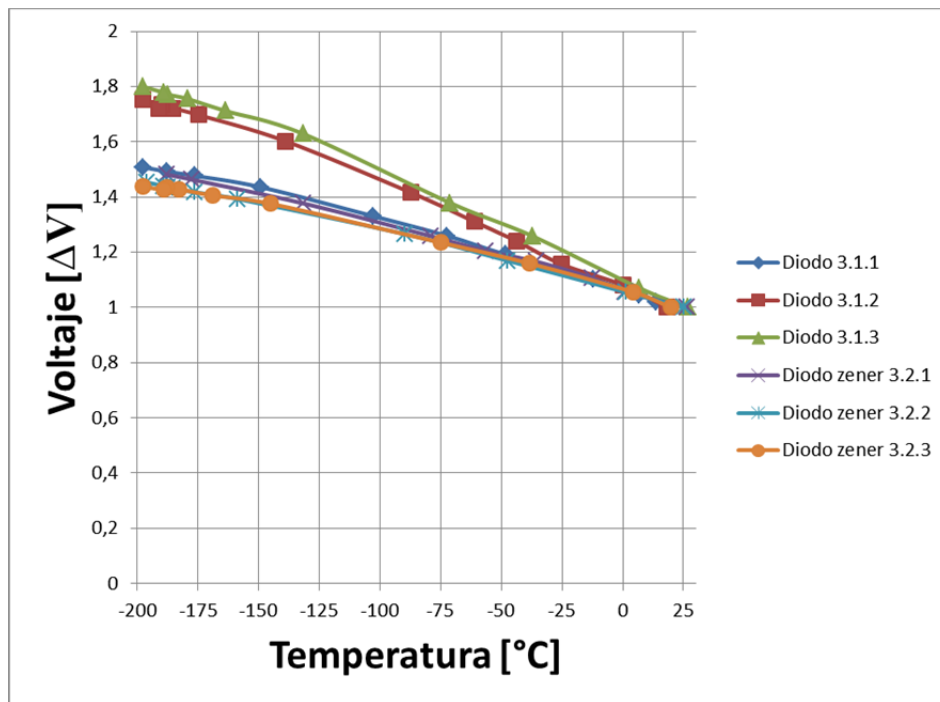


Fig. 72 Temperatura vs. Variación de voltaje en diodos de conmutación y zener

Como se puede observar en la gráfica, hemos comparado los resultados obtenidos por los diodos de conmutación y los diodos zener estudiados. El objetivo de esto, es ver la diferencia que existe entre los dos tipos de diodos cuando los enfrentamos a temperaturas criogénicas. Como se puede ver, los diodos zener sufren una menor variación de su voltaje umbral que los diodos de conmutación. También podemos decir que los diodos zener se comportan de una manera muy idéntica mientras que los diodos de conmutación hay una mayor diferencia entre ellos. Por último, todos los diodos sufren bastante variación a temperaturas criogénicas pero en todos ellos se repite más o menos el mismo comportamiento. Este aspecto se puede tener en cuenta y utilizar para algunas aplicaciones, siempre y cuando se realice previamente unos ensayos más exhaustivos de este hecho, siendo un posible estudio para otros investigadores.

## **4. PRESUPUESTO**

El presente presupuesto pretende establecer un coste total de ejecución material para la realización del proyecto.

<b>Equipo y Materiales</b>						
<i>Elemento</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Referencia</i>	<i>Empresa Ref. Interna</i>	<i>Coste unitario [€]</i>	<i>Coste de partida [€]</i>
<b>Nitrógeno líquido</b>	litros	100	V01	Air Liquide	2,00	200,00
<b>Tanque secundario: Capacidad 32l, MVE insulation. Evaporation rate 0,22 l/día</b>		1	V02	MVE MVE Lab 30	650,00	650,00
<b>Dewar: Capacidad 1l</b>		1	V03	Pobel	115,00	115,00
<b>Mesa 3D</b>		1	V04	Labtable S.A	120,00	120,00
<b>Multímetro digital</b>		1	V05	Kaise	130,00	130,00
<b>Sonda de temperatura Clase B</b>		10	V06	Phywe 514-140	16,95	169,50
<b>Sonda de temperatura clase B de mayor precisión</b>		5	V07	Phywe 514-183	29,80	149,00
<b>Condensador de papel 47[nF]</b>		5	V08	Evov-Rifa 206-7718	0,688	3,44
<b>Condensador electrolítico 100 [µF]</b>		50	V09	Yageo 440-6569	0,055	2,75
<b>Condensador cerámico monocapa 1 [nF]</b>		125	V10	Murata 721-5173P	0,104	13,00
<b>Condensador película</b>		25	V11	Epcos	0,182	4,55

**Sistema experimental para la caracterización de componentes electrónicos pasivos a temperaturas criogénicas**

de plástico 10 [nF]				334-243		
Condensador sólido de Tántalo 220 [nF]		5	V12	Vishay 684-4358	0,656	3,28
Condensador de Mica 100 [pF]		5	V13	Cornell-Dubilier 744-1530	1,108	5,54
Resistencia película de carbón 100 [ $\Omega$ ]		10	V14	TE Connectivity 132-258	0,037	0,37
Resistencia película de Cu-cobre 47 [K $\Omega$ ]		10	V15	Vishay 683-5798	0,212	2,12
Resistencia composición cerámica 10[ $\Omega$ ]		5	V16	TE Connectivity 377-4906	2,348	11,74
Resistencia metal vidriado 100 [K $\Omega$ ]		25	V17	Vishay 683-5284	0,128	3,20
Resistencia metal Vidriado 1 [M $\Omega$ ]		10	V18	Vishay 683-5313	0,461	4,61
Resistencia película de carbón 100[ $\Omega$ ]		10	V19	TE Connectivity 135-774	0,029	0,29
Resistencia hilo bobinado 1 [ $\Omega$ ]		5	V20	TE Connectivity 206-0672	0,558	2,79
Resistencia película metálica 100 [ $\Omega$ ]		5	V21	TE Connectivity 701-7068	0,86	4,30
Resistencia película metálica 1 [ $\Omega$ ]		10	V22	TE Connectivity 150-565	0,056	0,56
Resistencia película Cu-cobre 100 [ $\Omega$ ]		10	V23	Vishay 683-5685	0,212	2,12
Resistencia hilo bobinado 10 [ $\Omega$ ]		5	V24	Welwyn 159-376	0,972	4,86
Resistencia película metálica 1 [M $\Omega$ ]		10	V25	TE Connectivity 149-228	0,058	0,58

**Sistema experimental para la caracterización de componentes electrónicos pasivos a temperaturas criogénicas**

<b>Diodo BAS45A(13)</b>		20	V26	NXP 508-270	0,201	4,02
<b>Diodo BAV(20)-TAP</b>		200	V27	Vishay 708-7760	0,024	4,80
<b>Diodo DO41(119)</b>		250	V28	DiodesZetex 751-2718	0,036	9,00
<b>Diodo Zener BZX85 axial,1.3W 8V2</b>		5	V29	Magnatec 812-443	0,334	1,67
<b>Diodo Zener BZX85 axial,1.3W 6V8</b>		5	V30	Magnatec 812-421	0,314	1,57
<b>Diodo Zener BZX85 axial,1.3W 4V7</b>		5	V31	Magnatec 812-386	0,298	1,49
<b>Total equipos y materiales [€]</b>					<b>1626,15</b>	

<b>Equipo de seguridad</b>						
<i>Elemento</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Referencia</i>	<i>Empresa Ref. interna</i>	<i>Coste unitario [€]</i>	<i>Coste de partida [€]</i>
<b>Guantes hidrófugos siliconados con aislamiento específico para aplicaciones criogénicas</b>		1	S01	MaxFit	55,00	55,00
<b>Bata de algodón</b>		1	S02	MaxFit	6,00	6,00
<b>Pinzas de plástico termoestable</b>		4	S03	MaxFit	1,00	4,00
<b>Gafas de protección</b>		1	S04	Proglas	15,00	15,00
<b>Total equipo de seguridad [€]</b>					<b>80,00</b>	

**Sistema experimental para la caracterización de componentes electrónicos pasivos a temperaturas criogénicas**

Equipo informático						
<i>Elemento</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Referencia</i>	<i>Empresa Ref. interna</i>	<i>Coste unitario [€]</i>	<i>Coste de partida [€]</i>
<b>Ordenador de sobremesa: Acer M1935, Aspire M. V 3000 MHz, Intel Core i5, Procesador: i5-3330. Memoria interna: 4096 MB, memoria interna: DDR3-SDRAM. disco duro: 500 GB, Modelo de gráficos en tarjeta: HD Graphics 2500. Windows 7 y Microsoft Office 2007 Home edition. Drivers, lector de tarjetas 5 en 1 y programas instalados incluidos.</b>		1	I01	PCBOX ACER1663	654,00	654,00
<b>Cámara fotográfica Samsung PL10 de resolución 10 megapíxeles</b>		1	I02	Samsung PL10	110,00	110,00
<b>Tarjeta Memoria SD 8 Gb de capacidad</b>		1	I03	ScanDisk	20,00	20,00
<b>Tarjeta de adquisición de datos National Instruments 12 bits, 10 kS/s</b>				NI USB- 6008	169,00	169,00
		Total equipo informático [€]			953,00	

**Sistema experimental para la caracterización de componentes electrónicos pasivos a temperaturas criogénicas**

---

Software						
<i>Elemento</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Referencia</i>	<i>Empresa Ref. interna</i>	<i>Coste unitario [€]</i>	<i>Coste de partida [€]</i>
<b>NI Measurement &amp; Automation</b>	Días	120	S01	National Instruments	0,00	0,00
<b>Paint</b>	Horas	4	S03	Microsoft Windows	0,00	0,00
<b>Office 2007 y 2010 Home edition</b>	Horas	-	S04	Microsoft	0,00	0,00
			Total software [€]			<b>0</b>

**Personal:**

Personal					
<i>Elemento</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Referencia</i>	<i>Coste unitario [€/hora]</i>	<i>Coste de partida [€]</i>
<b>Investigador</b>	Horas	30	P01	35,00	1050,00
<b>Ayudante investigador</b>	Horas	60	P02	25,00	1500,00
			Total Personal [€]		<b>2550,00</b>

El montante Total asciende a:

<b>Total [€]</b>	<b>5209,15</b>
------------------	----------------

**“El presupuesto total de ejecución material de este proyecto asciende a cinco mil  
doscientos nueve euros con quince céntimos (5209,15 euros)”**

*No incluye IVA.*

*\* Incluye gastos de almacenamiento y distribución.*

*\*2 Licencia incluida con la adquisición del ordenador.*

## 5. CONCLUSIONES

Tras la finalización de este proyecto fin de carrera, se considera que los objetivos iniciales han sido satisfactoriamente cubiertos, y las siguientes conclusiones pueden ser extraídas:

- Se ha conseguido desarrollar un sistema experimental, de bajo coste, para la caracterización de componentes pasivos electrónicos a temperaturas criogénicas de temperatura ambiente a la del LN<sub>2</sub> (195,8°C). Este sistema está principalmente compuesto por un recipiente Dewar parcialmente lleno con LN<sub>2</sub>, un sistema que porta los componentes electrónicos a ensayar y los sensores de temperatura, un sistema móvil capaz de posicionar estos componentes dentro del Dewar y un sistema de muestreo y acondicionamiento de la señal.
- El gradiente de temperaturas dentro del Vaso Dewar es predominantemente vertical, siendo el gradiente radial mucho menor a este primero. También se observa un prolongado estado transitorio durante el enfriamiento cuyo tiempo de estabilización varía entre los 6 y 10 minutos para todas las posiciones. Este tiempo de estabilización establecido corresponde aproximadamente al 92% del tiempo total de estabilización.
- La precisión estimada en la temperatura es de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , para todo el rango de temperaturas en los ensayos. Es recomendable utilizar una interpolación cúbica para la transformación de los valores de resistencia a temperatura en los sensores termorresistivos Pt-100.
- Los sensores Pt-100 tipo “thin film” (lámina metálica) clase B empleados en los ensayos, muestran un comportamiento adecuado para todo el rango de temperaturas dentro del error previamente mencionado. Este tipo de sensores pueden representar una solución económica y viable para cierto tipo de aplicaciones.
- Se ha demostrado que algunos componentes electrónicos pasivos de uso común, tales como resistencias, condensadores o diodos pueden funcionar perfectamente a temperaturas criogénicas, incluso por debajo de las temperaturas mínimas



especificadas por sus fabricantes. Otros sin embargo no son adecuadas para este uso.

- Las resistencias de película metálica fabricadas con Zinc-Cobre y las resistencias de película de Cu-Cobre son las resistencias que sufren una menor variación y un mejor comportamiento. Las resistencias de película de carbón y las de metal vidriado sufren variaciones un poco mayores que las anteriores siendo aproximadamente del 5 o 6 %. Mientras que las resistencias de Composición cerámica y las de hilo bobinado sufren comportamientos peores bien sea porque sufren una variación de su valor de resistencia mayor o porque son poco lineales.
- Los condensadores electrolíticos, pierden el 99% de su capacidad a temperaturas inferiores a  $-50^{\circ}\text{C}$  y los condensadores cerámicos monocapa pierden a  $-80^{\circ}\text{C}$  el 75% de su capacidad aproximadamente, por tanto, ninguno son aptos para trabajar a temperaturas criogénicas. Sin embargo condensadores de papel y película de plástico sufren una variación de su capacidad de entre el 5 y el 10%. Un comportamiento excepcionalmente estable se observa en los condensadores de mica y sólidos de Tántalo sobre todo los de mica, con una variación máxima de aproximadamente 1%.
- Los diodos conmutación sufren una variación de voltaje umbral de entre un 35% a un 45%, siendo la relación entre voltaje y temperatura inversamente proporcional.
- Los diodos zener sufren una variación de voltaje umbral de aproximadamente un 30%, siendo la relación entre voltaje y temperatura inversamente proporcional. También podemos decir que en los diodos zener, su comportamiento no depende de la tensión zener que se escoja.

## 6. REFERENCIAS

- [1]. Chih-Cheng Hsieh, Chung-Yu Wu, Senior Member, IEEE, and Tai-Ping Sun. “A New Cryogenic CMOS Readout Structure for Infrared Focal Plane Array”. IEEE Journal of solid-state circuits, Vol. 32, No. 8, August 1997.
- [2]. R.K. Kirschman, “Cold electronics: an overview”. Received 27 August 1984, Cryogenics 1985 Vol 25 March.
- [3]. Ernest D. Buchanan, Dominic J. Benford, Joshua B. Forgione, S. Harvey Moseley, Edward J. Wollack. “Cryogenic applications of commercial electronic components”. Received 25 October 2011
- [4]. John Garrett, Roberto Schupbach, H. Alan Mantooth, Alexander B. Lostetter. “Development of an extreme environment DC motor drive full bridge power stage using commercial-off-the-shelf components”.
- [5]. R.L. Patterson, A. Hammoud, I.E. Dickman, S. Gerber, M.E. Elbuluk And E. Overton. “Electronic components and systems for cryogenic space applications”. Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 47.
- [6]. R.L. Patterson, A. Hammoud, J.E. Dickman, S. Gerber, M.E. Elbuluk, E. Overton. “Electronics for deep space cryogenic applications”. NASA/TM--2002-211695.
- [7]. Pradeep Haldar, Hua Ye, Harry Efstathiadis, James Raynolds, Mike J. Hennessy, Otward M. Mueller, and Eduard K. Mueller. “Improving Performance of Cryogenic Power Electronics”. IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 15, NO. 2, June 2005.
- [8]. W. A. Little, MMR Technologies, Inc., 1400 N. Shoreline. “Low Temperature Electronics Workshop: Recent Advances in Low Cost Cryogenic Coolers for Electronics”.
- [9]. Dr. John R. Samson, Jr. and Fred M. Cutting. “Thermal management for high performance computing in spaceborne applications”.
- [10]. Jack Bourne, Roberto Schupbach, Brent Hollosit, Jia Dit, Alexander Lostetter, and H. Alan Mantooth. “Ultra-Wide Temperature (-230 OC to 130 °C) DC-Motor Drive with SiGe Asynchronous Controller”. IEEEAC paper # 1146, Version 4, Updated October 24, 2007.

- [11]. Ignacio Valiente Blanco, Efrén Díez Jiménez, José Luís Pérez Díaz. “*Sistema experimental para la medición del ángulo de equilibrio entre imanes y superconductores*”. Septiembre de 2010.
- [12]. Ignacio Valiente Blanco, Dr. D. Ulpiano Rui. “*Cadena de medida caracterización de componentes electrónicos pasivos a temperaturas criogénicas*”. Enero de 2012.
- [13]. <http://libros.redsauce.net/Termodinamica/PDFs/14Termod.pdf> [2012].
- [14]. <http://fisica.cab.cnea.gov.ar/bt/images/d/d8/Ferialibro.pdf> [2012].
- [15]. [http://www.lcardaba.com/articles/R\\_tipos/R\\_tipos.htm](http://www.lcardaba.com/articles/R_tipos/R_tipos.htm) [2012].
- [16]. <http://perso.wanadoo.es/abeldg/documentacion/condensadores.pdf> [2013].
- [17]. <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Los-condensadores.php> [2012].
- [18]. [http://www.frm.utn.edu.ar/tecnologiae/apuntes/capacitores\\_parteII.pdf](http://www.frm.utn.edu.ar/tecnologiae/apuntes/capacitores_parteII.pdf) [2013].
- [19]. <http://moblog.whmsoft.net/es/Encuentros.php?keyword=diodo+zenner+datasheet&language=spanish> [2013].
- [20]. <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/436-diodo-zenner> [2013].
- [21]. [http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/LSED/2003-04/0.Sens\\_Temp/ARCHIVOS/SensoresTemperatura.pdf](http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/LSED/2003-04/0.Sens_Temp/ARCHIVOS/SensoresTemperatura.pdf) [2013].
- [22]. <http://tec.upc.es/ie/RTDs.pdf> [2012].
- [23]. <http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf> [2013].
- [24]. <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=21&resId=1&materialId=slides&confId=38777> [2013].
- [25]. <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c18/Maquinas%20termicas%20de%20refrigeracion.pdf> [2013].
- [26]. <http://www.lahistoriaconmapas.com/historia/historia2/definicion-de-criogenia/> [2013].
- [27]. <http://globosatiie.googlecode.com/svn/trunk/globosatiie/CD%20del%20proyecto/Sensores%20de%20temperatura%20externa/PDFs/RTD%5B1%5D.pdf> [2013].

## 7. ANEXOS

### ANEXO I. MANUAL DE SEGURIDAD

El presente anexo pretende servir de referencia como protocolo de seguridad para su utilización en el laboratorio en experimentos futuros en los que se emplee nitrógeno líquido o se manipulen imanes.

#### **0. Personal al que va dirigido.**

Toda persona que pueda tener contacto con el nitrógeno líquido y/o con imanes permanentes y que participe de alguna manera en su transporte, almacenamiento o manipulación incluido especialmente el personal investigador que lo utilice en futuros ensayos.

#### **1. Utilización de Nitrógeno Líquido**

El nitrógeno líquido es un compuesto que puede resultar peligroso para la seguridad de los usuarios e incluso bajo determinadas condiciones, puede provocar la muerte. Por lo tanto, es imprescindible conocer los riesgos que presenta:

- **Riesgo de inhalación:** El nitrógeno molecular en estado gaseoso se produce por el calentamiento del nitrógeno líquido en contacto con una fuente de calor como puede ser la atmósfera. Puede causar asfixia por desplazamiento de oxígeno ya sea en espacios abiertos o cerrados. En concentraciones importantes pueden causar la muerte con sólo dos inhalaciones. En humanos este desplazamiento de oxígeno puede causar los síntomas recogidos en la figura AI.1.

<b>Concentración</b>	<b>Síntomas de exposición</b>
12-16% Oxígeno	Respiración y grados del pulso aumenta, coordinación muscular ligeramente alterada.
10-14% Oxígeno	Efectos emocionales, fatiga anormal, respiración perturbada.
6-10% Oxígeno	Náuseas y vómito, colapso o pérdida de la conciencia.
Por debajo 6%	Movimientos convulsivos, colapso respiratorio y posible muerte.

*Tabla 13. Efectos de la carencia de oxígeno en el ser humano.*

- **Riesgo de contacto:** En contacto con la piel o los ojos puede producir quemaduras por congelación de diferente grado y el contacto prolongado con grandes cantidades de nitrógeno puede provocar la congelación completa de miembros provocado su amputación.

Es un gas inodoro e incoloro, por lo cual es difícil su identificación. Este gas es muy estable y no presenta riesgos de reacción con otros elementos ni riesgos de combustión.

### **Consejos de seguridad**

Teniendo en cuenta los riesgos que presenta la utilización de nitrógeno líquido durante el experimento, se plantean los siguientes consejos de seguridad:

#### **1. Ventilación**

Cuando se trabaje en recintos cerrados, es preciso que exista una ventilación adecuada que permita la evacuación del gas producido en la evaporación del nitrógeno líquido. Nunca se debe trabajar con nitrógeno líquido en atmósferas con concentraciones de oxígeno menores al 19,5% sin emplear equipos de respiración autónomo [24-25]. En el escenario en el cual se desarrolló el presente proyecto se recomienda abrir la ventana de la fachada que da al exterior y que la puerta del laboratorio permanezca abierta para facilitar la ventilación natural del recinto.

## **2. Zona de trabajo**

La zona de trabajo debe permanecer libre de obstáculos que pudiesen provocar colisiones accidentales, provocando el derramamiento del nitrógeno líquido durante su manipulación o transporte.

Por tanto se recomienda encarecidamente, con vista a futuros experimentos similares, mantener el orden y la limpieza del laboratorio evitando la presencia de herramientas u objetos cercanos a la zona de trabajo o en el suelo de la zona de trabajo y en el recorrido de transporte del nitrógeno.

## **3. Equipo de protección y manipulación**

Para la manipulación del nitrógeno se recomienda encarecidamente emplear:

a. Guantes impermeables y aislantes como los que se muestran en la fig. 69 para evitar quemaduras en manos y antebrazos por derramamiento del líquido durante su trasvase entre depósitos o del Dewar al recipiente de ensayo, así como durante el desarrollo del experimento si se trabaja con nitrógeno.



**Fig. 73 Guantes aislantes.**

b. Bata de algodón. Tejidos textiles de este tipo no absorben el nitrógeno líquido que pasa a través de las fibras sin humedecerlas. Sin embargo, puede proteger del contacto con objetos en temperaturas criogénicas o de los vapores emanados.

c. Gafas de protección. Evitar riesgos de quemaduras en los ojos debido a salpicaduras accidentales o a causa de los vapores. El contacto directo del nitrógeno líquido con los ojos es extremadamente peligroso ya que las probabilidades de provocar quemaduras graves son muy elevadas.



*Fig. 74 Gafas de protección.*

d. Pinzas de plástico termoestable para manipular las pastillas superconductoras, los imanes y cualquier otro objeto equipo que durante el experimento pueda entrar en contacto con el nitrógeno líquido.



*Fig. 75 Pinzas de plástico.*

#### **4. Traslado y traslado del nitrógeno líquido**

a. El depósito principal es un depósito a alta presión y se encuentra ubicado en las instalaciones de la universidad. Dispone de una manguera para el trasvase al tanque secundario y una válvula de apertura manual como se muestra en la figura AI.4.



*Fig. 76 Depósito principal de nitrógeno líquido de la Universidad Carlos III de Madrid.*

Durante el proceso de recarga se debe introducir la manguera dentro del depósito secundario lo suficiente para que no se pueda salir.



A continuación se abre la válvula manual al máximo y el operario debe entonces apartarse una distancia de seguridad de aproximadamente 2 metros para evitar la inhalación de los vapores que se producen. Evitase entrar en contacto con esta nube de vapor.

Una vez la nube se retira y el tanque se llena, se procederá a cerrar la válvula, verificando que está completamente cerrada y se extraerá la manguera.

Toda la operación de carga debe hacerse con el equipo de protección (ver consejo de seguridad 3).

b. Durante el proceso de recarga, el tanque y el Dewar o tanque secundario deben situarse sobre una superficie perfectamente estable y plana, preferiblemente el suelo, en posición completamente vertical.

Si el desplazamiento del tanque secundario hasta el laboratorio se hace sobre una plataforma móvil, se recomienda poner el freno durante la recarga o en caso de que la plataforma careciese de freno, calzar las ruedas para evitar desplazamientos accidentales.

c. Para el traslado del tanque secundario desde el depósito principal hasta el laboratorio, esto debe hacerse bien entre dos personas portando el depósito conjuntamente o empleando una plataforma móvil pues el tanque lleno pesa aproximadamente 32 kg. Bajo ninguna circunstancia trasladar solo el tanque hasta el laboratorio sin plataforma móvil.

d. Tanto el tanque secundario como el Dewar deben permanecer en posición vertical siempre que contengan nitrógeno líquido, no solamente en su carga y se deben situar en zonas donde no entorpezcan el paso de otros usuarios de la nave o del propio investigador, en una zona visible y segura, señalizando debidamente el contenido criogénico del tanque secundario.

e. Si tras finalizar el trabajo, existe nitrógeno sobrante en el Dewar, este debe ser almacenado de nuevo en el tanque secundario, nunca debe dejarse nitrógeno sobrante en el Dewar y abandonar las instalaciones.

#### **5. Medidas en caso de vertido accidental.**

En caso de vertido accidental se debe evacuar al personal a zonas seguras y ventiladas. Impedir nuevos escapes o derrames si no se pone en riesgo la seguridad propia de la persona que lo hace y esperar hasta que se restablezca una atmósfera segura. Si la concentración de oxígeno descendiese demasiado (ver apartado 1 de este anexo) no se debe acceder a la zona sin equipo de respiración auxiliar.

#### **6. Medidas en caso de inhalación o entrada en contacto**

Se proponen las siguientes medidas:

- En caso de inhalación: Retirar a la víctima de la zona afectada y trasladarla a un lugar ventilado tan pronto como sea posible; mantener a la víctima caliente y en reposo. Ponerse en contacto con personal sanitario de inmediato. En caso de producirse una parada respiratoria, personal cualificado debe aplicar la reanimación cardiopulmonar o RCP [25].
- En caso de contacto: Si el líquido criogénico o el gas vaporizado hacen contacto con la piel o los ojos del operario, los tejidos congelados deben lavarse abundantemente con agua tibia (25-30°C). No use agua caliente. Calentar progresivamente la zona afectada con otras partes del cuerpo. Las quemaduras criogénicas que produzcan ampollas o la congelación profunda de los tejidos deben ser atendidas de inmediato por un médico [26].

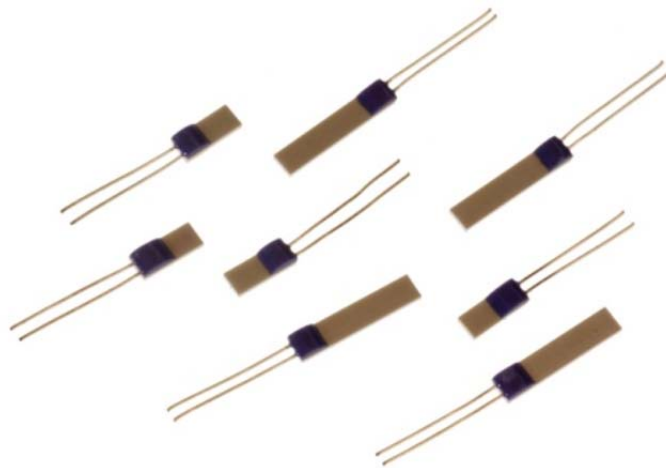
### **7. Materiales**

Todos aquellos materiales, objetos o herramientas que se pongan en contacto durante el experimento con el nitrógeno líquido deben resistir temperaturas criogénicas que pueden producir contracciones importantes en algunos tipos de materiales, provocando su degradación o rotura.

## ANEXO II. Características de los sensores PT 100 utilizados en el proyecto

### **Pt100 Elements, Thin Film (100 Ohm)**

- Pt100 elements to IEC751 Class A, B and 1/3DIN
- For use from  $-50^{\circ}\text{C}$  to  $+500^{\circ}\text{C}$
- Thin film construction
- Suitable for surface & immersion applications where protected
- Vibration resistant



*Fig. 77 Sensores PT 100 Thin film (lámina metálica).*

### **Specifications:**

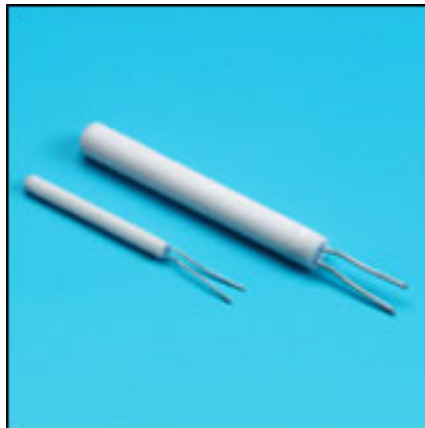
- |  |   |
|--|---|
| • Sensor type:   | Pt100 (100 Ohms @ $0^{\circ}\text{C}$ )         |
| • Construction:  | Thin film, 10mm tails                           |
| • Temperature range:   | $-50^{\circ}\text{C}$ to $+500^{\circ}\text{C}$ |
| • Ice point resistance:  | $100\Omega$                                     |
| • Fundamental interval ( $0^{\circ}\text{C}$ to $100^{\circ}\text{C}$ ): | $38.5\Omega$ (nominal)                          |
| • Self heating:  | $<0.5^{\circ}\text{C}/\text{mW}$                |
| • Thermal response:  | 0.1s  |
| • Stability:   | $\pm 0.05\%$                                    |
| • Temperature coefficient:   | $0,00385\ \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$       |

Resistance	Dimensions (width x length)	Tolerance Class	RS order code
Pt100	2 x 5.0mm	Class A	611-7788
Pt100	2 x 5.0mm	Class B	611-7801

Resistance	Dimensions (width x length)	Tolerance Class	RS order code
Pt100	2 x 5.0mm	Class B	290-5070
Pt100	2 x 10mm	Class A	362-9799
Pt100	2 x 10mm	Class B	237-1607
Pt100	2.0 x 10mm	1/3DIN	362-9812
Pt100	2.0 x 2.3mm	Class A	362-9834
Pt100	2.0 x 2.3mm	Class B	362-9840
Pt100	2.0 x 2.3mm	1/3DIN	362-9856
Pt100	1.2 x 1.6mm	Class A	666-7362
Pt100	1.2 x 1.6mm	Class B	666-7353
Pt100	1.0 x 3.0mm	Class A	666-7359
Pt100	1.0 x 3.0mm	Class B	666-7356

### **Pt100 Elements, Wirewound (100 Ohm)**

- Resistencia nominal: 100ohms a 0°C (138.5ohms a 100°C)
- Clase de tolerancia: B y A según la norma IEC 60751 de clase 1/3, 1/5 y 1/10
- Rango: -200°C a 600°C
- Dimensiones: 3 x 25mm o 1.6 x 15mm (diámetro x longitud)
- Hilos: 10mm de longitud (el valor nominal es medido a 5mm del extremo)
- Coeficiente de temperatura de 0,003923  $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$



*Fig. 78 Sensores PT100 Wire wound (hilo enrollado)*

Elemento Cilíndrico Cerámico Pt100 3mm x 25mm

Elemento Cilíndrico Cerámico Pt100 1.6mm x 15mm